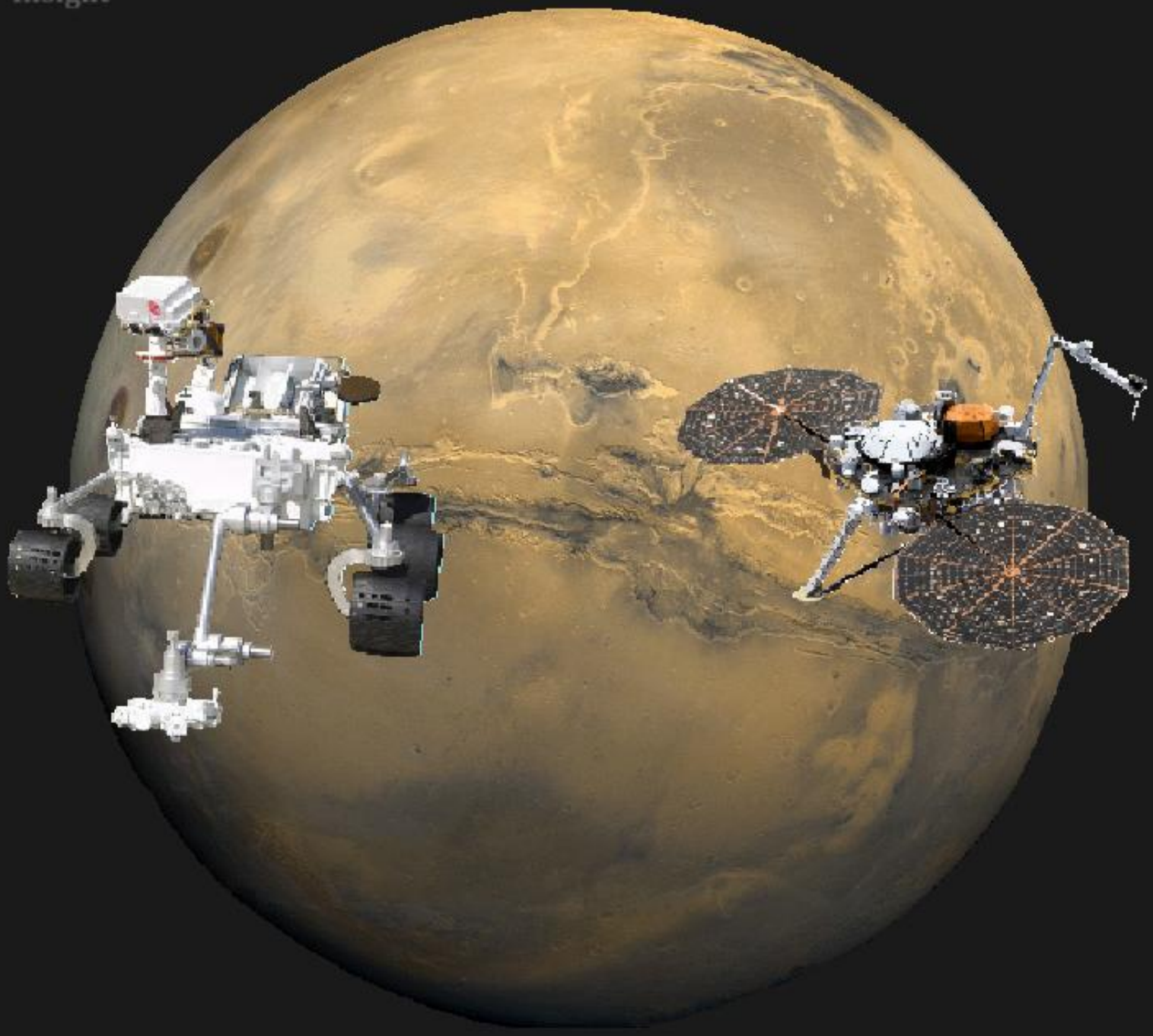
Les Panoramiques Martiens

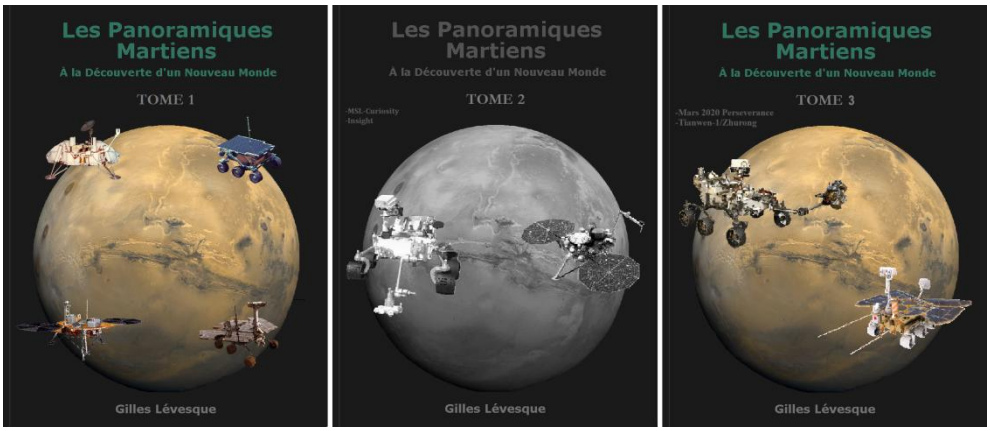
À la Découverte d'un Nouveau Monde

TOME 2

-MSL-Curiosity
-Insight



Gilles Lévesque



Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International

Les Panoramiques Martiens

À la découverte d'un nouveau monde

TOME 2

Gilles Lévesque
gilleslevesque98@gmail.com

Illustration de couverture :
Photo d'arrière plan : NASA/Viking 1 Orbiteur : 22-02-1980
Montage graphique de l'auteur

ISBN

© 2007-2035, ÉDITEUR

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayant cause, est illicite et constitue une contrefaçon, aux termes des articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Un merci tout spéciale aux magiciens de la retouche d'image de l'Ancien Forum UMFS (fermé et archivé sur Internet Archive en janvier 2025[1]) et autres :

Jan van Driel
Damia Bouic
Neville Thompson (NeV-T)
Thomas Appéré
Ed Truthan
Iñaki Docio
Elisabetta Bonora
Marco Faccin
Kevin M. Gill
Seán Doran
Doug Ellison
Philip J. Stooke
Emily Lakdawalla
James Sorenson
Don Davis
Fredk
Olivier de Goursac
Paul Hammond
Jason Davis

[1] https://umsfarchive.com/index.php/index.php

SOMMAIRE

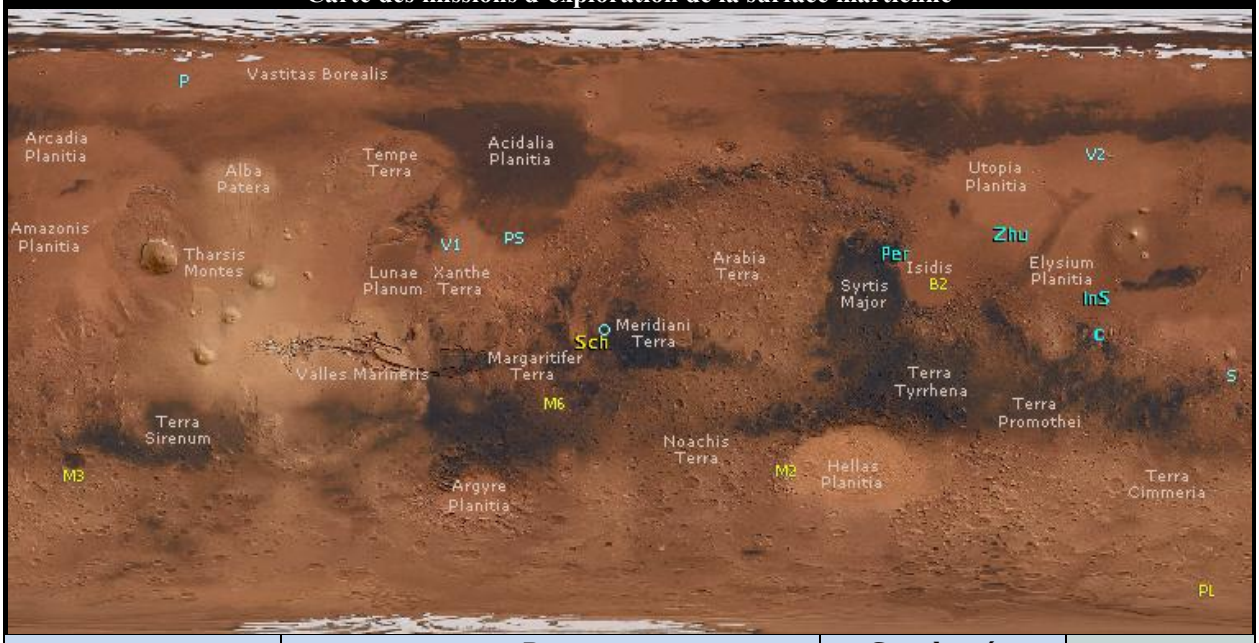
Introduction **1**
Les Panoramiques de MSL-Curiosity **9**
L'équipement Scientifique du Rover **12**
En Route vers Glenelg **15**
Le fonctionnement de SAM **30**
Vers le Mont Sharp **31**
Distinction entre roche Mafique et Felsique **52**
De Kimberley à Pahrump Hills **53**
Pahrump Hills **67**
L'ascension du Mont Sharp **77**
De Murray Buttes à Gediz Vallis **97**
Gediz Vallis **123**
Gediz Vallis Channel **143**
Vers Bosworks **161**
En Route Vers Les Yardangs **177**
Les Panoramiques d'InSight **193**
L'équipement de l'atterrisseur InSight **193**
Transite et Atterrissage **199**
InSight et l'Exploration Martienne **201**
Annexe **237**
MSL-Curiosity **239**
InSight **261**
Références Web **269**

INTRODUCTION

Ce livre relate l'histoire des missions d'explorations spatiales MSL-Curiosity et InSight, qui ont suivi les six premières missions qui ont réussi à se poser en douceur à la surface de la planète Mars (traitées dans le tome 1), et qui ont été capables par la suite de remplir avec succès les différents objectifs de leurs missions. Les deux missions suivantes, soit Mars 2020 Perseverance et Tianwen-1 Zhùróng seront traitées dans le tome 3. Il s'agit d'une extraordinaire aventure humaine qui a grandement contribué à changer notre vision de l'histoire géologique de la planète rouge, et qui nous a dévoilé pour la première fois à quoi pouvait bien correspondre la surface d'un autre Monde. Les atterrisseurs (lander) et les astromobiles (rover) qui ont exploré la surface martienne, nous ont fait parvenir de magnifiques clichés panoramiques qui nous ont dévoilés le visage de la planète à travers différents sites d'atterrissages. Ce livre utilise ces clichés sous la forme d'un album souvenir, afin de décrire de manière chronologique le déroulement et les différentes découvertes scientifiques de chaque mission. Les découvertes scientifiques exposées dans ce livre sont basées sur les documents de chaque équipe ayant participé à ses missions de la NASA, ainsi que plusieurs autres publications d'études sur le sujet. L'analyse in situ de l'altération chimique et minéralogie des roches et des échantillons récoltés sur le sol martien, ainsi que l'étude des différentes strates géologiques rencontrées sur les sites d'atterrissages ou sur le parcours des différents astromobiles, nous permet entre autres de retracer le contexte historique et de mieux comprendre l'évolution de la planète Mars à travers ses différentes époques géologiques.

L'exploration in situ du sol martien a été effectuée en plusieurs étapes entre les années 1960 et 2008, et elle faisait suite à la première tentative réussie de la mise en orbite d'une sonde spatiale autour de la planète. Le début de l'exploration spatiale de la planète Mars a été marqué de plusieurs échecs, soit par l'explosion au décollage des fusées porteuses russes au début des années 1960, ou par la perte du signal de télécommunication avec les sondes durant leurs trajets vers Mars (Figure 2). Dans un deuxième temps, il y a eu le premier survol réussi de la planète qui a été effectuée par la sonde américaine Mariner 4 le 14 juillet 1965. Lors de son unique passage à proximité de la planète, la sonde a eu le temps de prendre et de transmettre vers la Terre les toutes premières images de la planète rouge, soit un total de 22 images qui couvraient environ 1% de la surface martienne. L'exploration spatiale de Mars va se poursuivre quatre années plus tard, avec la sonde américaine Mariner 6 qui a frôlé la planète le 31 juillet 1969, soit 10 jours après l'événement historique du premier pas de l'homme sur la lune lors de la mission Apollo 11. Durant son unique survol rapproché de la planète, qui s'est effectué sur une trajectoire équatoriale, la sonde a pris 76 images qui incluent 50 plans éloignés du globe martien et 26 plans rapprochés de la surface de la planète. Six jours plus tard (5 août), ce fut le tour de la sonde américaine Mariner 7 à faire un survol rapproché de la planète Mars, qui s'est effectué cette fois-ci sur une trajectoire polaire. La sonde a eu le temps de transmettre vers la Terre un totale de 126 images, soit 93 nouveaux plans éloignés du globe martien et 33 nouvelles prises de vue rapprochées de la surface.

Carte des missions d'exploration de la surface martienne



Mission	Date				Coordonnées		Site d'atterrissage
	Départ	Arrivés	Fin	Durée (Sols-Jours)	Latitude	Longitude	
Les Missions Réussies							
Viking 1 (V1)	20-08-1975	20-07-1976	13-11-1982	2246 – 2306	22,27° N	47,95° W	Chryse Planitia
Viking 2 (V2)	09-09-1975	03-09-1976	11-04-1980	1281– 1316	47,64° N	134,29° E	Utopia Planitia
Pathfinder (PS)	04-12-1996	04-07-1997	27-09-1997	83 – 85	19,33° N	33,55° W	Ares Vallis
Spirit (S)	10-06-2003	04-01-2004	22-03-2010	2210 – 2269	14,57° S	175,47° E	Gusev Crater
Opportunity (O)	08-07-2003	24-01-2004	10-06-2018	5111 – 5250	1,95° S	5,53° W	Meridiani Planum
Phœnix (P)	04-07-2007	25-05-2008	02-11-2008	157 – 160	68,22° N	125,75° W	Vastitas Borealis
MSL Curiosity (C)	26-11-2011	06-08-2012	------	–	4,5 S	137,44° E	Gale Crater
InSight (InS)	05-05-2018	26-11-2018	15-12-2022	1440 – 1480	4,5 N	135,62° E	Elysium Planitia
Mars 2020/Perseverance (Per)	30-07-2020	18-02-2021	------	–	18,45° N	77,45° E	Jezero Crater
Tianwen-1/Zhurong (Zhu)	23-07-2020	14-05-2021	18-05-2022	359 – 369	25,1° N	109,9° E	Utopia Planitia
Les Missions Échouées							
Mars 2 (M2)	19-05-1971	27-11-1971			45° S	47° E	Hellas Planitia
Mars 3 (M3)	28-05-1971	02-12-1971			45° S	158° W	Ptolemaeus Crater
Mars 6 (M6)	05-08-1973	12-03-1974			23,9° S	19,42° W	Margaritifier Sinus
Mars Polar Lander (MPL)	03-01-1999	03-12-1999			76° S	165° E	Planum Australe
Beagle 2 (B2)	02-06-2003	25-12-2003			11,53° N	90,43° E	Isidis Planitia
ExoMars/Schiaparelli (Sch)	14-03-2016	19-10-2016			2,05° S	6,21° W	Meridiani Planum

L'orbiteur américain Mariner 9, après la perte de Mariner 8 lors du lancement, a été la première sonde d'exploration spatiale à réussir avec succès des manœuvres d'insertions orbitales autour de la planète Mars le 14 novembre 1971. C'était également la première fois dans toute l'histoire de l'exploration spatiale, qu'une sonde se mettait en orbite autour d'une autre planète. Durant le long trajet de 167 jours de Mariner 9 vers Mars, une vaste tempête de poussières globale s'était levé dans la région de « Noachis Terra » le 22 septembre 1971 qui masquait toute la surface de la planète. Mariner 9 doit attendre encore un mois et demi avant que la tempête se calme et de pouvoir envoyer les premières photos de la surface de Mars le 2 janvier 1972. La mission initialement prévu pour une durée de 90 jours, a cependant dépassé très largement cette longévité en fonctionnant correctement pendant plus de 349 jours, soit presque quatre fois plus que l'estimation initiale. La perte de la sonde a été causée par l'épuisement du gaz (azote) qui servait à la stabilisation de l'altitude de son orbite. N'ayant plus les moyens de corriger les

Calendrier des saisons martiennes – HN hémisphère nord, HS hémisphère sud			
Equinoxe	**Solstice**	**Equinoxe**	**Solstice**
Printemps HN Automne HS	**Été HN Hiver HS**	**Automne HN Printemps HS**	**Hiver HN Été HS**
5 mars 2004	20 septembre 2004	23 mars 2005	17 août 2005
22 janvier 2006	8 août 2006	8 février 2007	5 juillet 2007
10 décembre 2007	25 juin 2008	26 décembre 2008	22 mai 2009
27 octobre 2009	13 mai 2010	13 novembre 2010	9 avril 2011
14 septembre 2011	30 mars 2012	30 septembre 2012	24 février 2013
1er août 2013	15 février 2014	18 août 2014	12 janvier 2015
19 juin 2015	3 janvier 2016	5 juillet 2016	29 novembre 2016
6 mai 2017	20 novembre 2017	23 mai 2018	17 octobre 2018
24 mars 2019	8 octobre 2019	9 avril 2020	3 septembre 2020
8 février 2021	25 août 2021	25 février 2022	22 juillet 2022
27 décembre 2022	13 juillet 2023	13 janvier 2024	8 juin 2024
12 novembre 2024	29 mai 2025	29 novembre 2025	25 avril 2026

dérives orbitales, la sonde fut désactivée le 27 octobre 1972 et elle devrait percuter le sol martien vers l'année 2022. La mission fut dans son ensemble une très grande réussite, avec une collecte de 7 329 images de la planète et de ses deux lunes : Phobos et Deimos. Les images de Mariner 9 nous ont dévoilés pour la toute première fois les merveilles géologiques qui se cachaient à la surface de la planète, comme par exemple l'énorme volcan-bouclier « Olympus Mons » de 27 km d'altitude, la grande faille géologique « Valles Marineris » de 4 000 km de long sur près de 200 kilomètres de large dans certaines régions et par 7 kilomètres de profondeur, ainsi que plusieurs chenaux d'inondations et vallées de débâcles. Les données transmises lors de cette mission ont permis de mieux connaître les différentes conditions physiques qui règnent à la surface de la planète, tout en donnant l'occasion aux ingénieurs et aux techniciens de la NASA de mieux comprendre les technologies nécessaires pour mener à bien de long voyage interplanétaire vers Mars. Les images transmises par la sonde Mariner 9 ont également permis de dresser la toute première carte complète de la planète (85%), qui sera utilisée plus tard pour identifier les futurs sites d'atterrissages des prochaines missions d'exploration spatiale qui seront dirigées vers la surface martienne.

Les Américains vont se lancer dans l'exploration de la surface martienne à partir de 1968, en mettant sur pied le très ambitieux programme Viking. Les débuts de l'exploration spatiale de la surface de la planète Mars ont été très difficiles, et les premières tentatives russes se sont soldées par des échecs avec la perte successive des sondes Mars 2 et Mars 3, le 27 novembre et le 2 décembre 1971, suivit deux années plus tard par les sondes Mars 6 et Mars 7 le 12 et le 9 mars 1974. Les sondes Mars 2-3 et 6 ont été les premiers engins construits par l'homme à s'écraser à la surface de la planète rouge (voir la carte des missions d'explorations de la surface martienne). Le programme américain de l'exploration spatiale de la surface de la planète rouge va aboutir en 1976 avec la réussite des deux missions Vikings, qui nous ont alors offerts pour la première fois de magnifiques clichés panoramiques de paysage martien se trouvant à la surface de la planète. Le programme Viking sera par la suite suivi par la mission de démonstration technologique Mars Pathfinder en 1997, des missions géologiques MER (Mars Exploration Rover) composées des robots Spirit et Opportunity en 2004, par la mission Phœnix en 2008 et par la mission Curiosity en 2012 (traité dans le Tome 2). La mission des robots Spirit et Opportunity était axée sur l'analyse de la composition chimique et minéralogique du sol et des roches, dans le but de faire

Tableau des Ères géologiques martiennes			
Chronologie basée sur la taille et le nombre des cratères d'impacts sur la planète Mars. (Scott et Carr., 1978 et Jakosky et Phillips, 2001)		**Chronologie basée sur la minéralogie fait à partir des données fournie par l'instrument OMEGA de Mars Express. (Bibring, et al., 2006)**	
Ère (Ga)	**Description**	**Ère (Ga)**	**Description**
Noachien 4,6 à 3,5	Forte activité volcanique avec la formation du dôme de Tharsis et des vallées ramifiées du sud, Une atmosphère plus dense et plus chaude qui favorise l'écoulement de l'eau à la surface. Le bombardement de météorite reste encore intense. (Noachien Terra)	**Phyllosien** 4,5 à 4,2	L'ère des phyllosilicates hydratés et des argiles avec une atmosphère plus dense et une température de surface plus clémente favorisant l'écoulement de l'eau à la surface de la planète durant plus de 300 Ma. Le bombardement de météorite reste encore intense.
Hespérien 3,5 à 2,0	Formation des chenaux de débâcles dans les régions chaotiques et progression du soulèvement du dôme de Tharsis avec la formation des réseaux de canyons de Valles Marineris. (Hespérien Planum)	**Phase de transition**	Soulèvement du dôme de Tharsis et pic de l'activité volcanique avec émission d'une grande quantité de soufre avec l'altération acide des sols. Chute drastique de la pression atmosphérique.
Amazonien 2,0 à 0	L'activité volcanique diminue, avec une augmentation de l'érosion éolienne dans un environnement plus sec propice à la formation des oxydes de fer, formation de la partie supérieure du volcan Olympus. (Amazonien Planitia)	**Theiikien** 4,2 et 3,8	Arrêt de la dynamo martienne et début de l'ère des sulfates avec pics de l'activité volcanique de plaine (failles), et formation de Valles Marineris.
		Siderikien 3,8 à 0	L'ère des oxydes ferriques avec une atmosphère plus sèche propice à la formation des oxydes de fer.

une étude sur la durée de l'action corrosive de l'eau. La mission Phoenix avait pour objectif d'étudier les indices de la présence de l'eau sous toutes ses formes, afin d'évaluer le potentiel d'habitabilité à la surface de la planète, que Curiosity complétera par la suite avec des analyses chimiques et minéralogiques plus poussées, portées sur l'indice d'altération et d'hydratation d'échantillons de sol et de roches qui auront été recueillis plus en profondeur dans le sous-sol martien, avec en prime la recherche de composés carbonatés et organique.

La grande réussite des missions américaines dans l'exploration spatiale de la surface martienne, face aux échecs successifs des missions Russes, qui vont cependant se reprendre plus tard dans l'exploration de Vénus, vient principalement du fait que les Américains ont adapté l'équipement de leurs sondes spatiales aux rudes conditions de navigation dans l'espace, contrairement aux Russes qui se contentait uniquement de pressuriser l'équipement de leurs sondes à l'intérieur de modules hermétiques. Les sondes américaines étaient également programmables à distance tout au long de leurs missions, contrairement aux sondes soviétiques qui étaient programmées uniquement avant leur départ et qui naviguaient par la suite en aveugle. Cet avantage technologique a permis aux Américains de faire face à des conditions de navigation imprévues, comme celles rencontrées lors de la mission de Mariner 9.

Les données recueillies par les huit missions américaines qui ont atterri avec succès à la surface de la planète rouge, nous ont permis de mieux comprendre l'histoire géologique passée et présente de la planète Mars (voir le tableau sur les Ères géologiques martiennes). Les indices d'altérations minéralogiques trouvés par les quatre atterrisseurs (Viking 1-2, Pathfinder, Phœnix et InSight) et par les quatre astromobiles (Sojourner, Spirit, Opportunity et Curiosity) sur la présence passée et prolongée de l'écoulement d'une certaine quantité d'eau à la surface de la planète. Semble indiquer qu'il y a eu à l'occasion dans l'histoire récente de la planète des

épisodes d'écoulements d'une faible quantité d'eau à sa surface, mais qui aurait été beaucoup plus abondante à une époque plus précoce. Un écoulement qui aurait cessé très tôt dans l'histoire de la planète, mais qui à l'occasion sortirait localement du sous-sol par des failles lors d'activités géologiques, volcaniques et météoritiques et par des cycles climatiques de longue durée (cycles astronomique de Milankovitch). La compréhension de l'histoire géologique martienne a également été obtenue grâce aux données fournies par les sondes orbitales suivantes : Mars Globale Surveyor (MGS), Mars Odyssey, Mars Express, Mars Reconnaissance Observer (MRO), MAVEN et ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO).

L'altération des roches par le soufre découvert par les rovers Spirit, Opportunity et Curiosity, indique qu'il a déjà existé une certaine activité corrosive dans le passé de Mars. Celle-ci aurait été causée par l'écoulement d'une faible quantité d'eau chaude et acide à la surface de la planète, qui aurait réagi avec les gaz libérés dans l'atmosphère martienne lors d'épisodes d'éruption volcanique (Theiikien) avant d'altérer par la suite la composition chimique des roches. La grande quantité d'olivine d'origine basaltique et volcanique dans les terres basses du nord, qui est un minéral très instable en présence d'eau, indique également que cet écoulement épisodique a été très localisé et de très courte durée à une époque plus tardive. Les données fournies par les sondes Phœnix et Curiosity indiquent très clairement que la vie aurait pu exister au tout début de l'histoire martienne, quand l'eau était beaucoup plus abondante à sa surface favorable à la formation des argiles, et qu'elle pourrait toujours subsister de nos jours sous la forme de spores endormies enfouies dans les profondeurs de la planète, et qui attendraient par exemple des moments plus propices pour se réveiller ? Il existe sur Terre des formes de vie extrêmophile de type chimiotrophe qui tirent leur énergie de composés chimiques, et qui utilisent comme source de nourriture des matériaux très oxydants, comme le perchlorate découvert par la sonde Phœnix en 2008. D'autres organismes extrêmophiles (bactéries et archées) sont très résistants aux températures basses (psychrophiles), tandis que d'autres sous forme de spores peuvent résister au voyage spatial, ou encore sont très résistants aux radiations ionisantes.

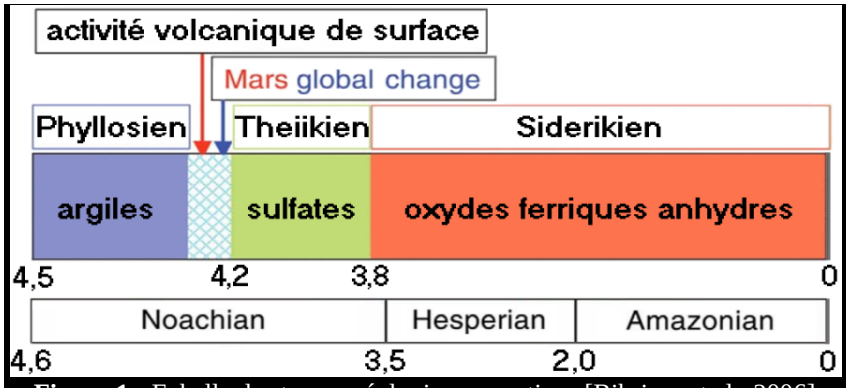


Figure 1 : Echelle des temps géologiques martiens [Bibring, et al., 2006]

Mais avant d'aller plus loin sur les possibilités de la vie martienne passée et présente, comme semble le suggérer le retour du débat autour de la météorite ALH 84001 parue dans un article de la revue Scientific American le 26 novembre 2009. Il faudra attendre les résultats des prochains programmes d'exploration spatiale de la surface de la planète Mars, qui seront effectuées entre autre par la mission américaine Mars 2020 avec l'astromobile Perseverance lancé le 30 juillet 2020 (Tome 3) faisant partie de la première phase du vaste programme Mars Sample Return (MSR). Et parle vaste programme européen Exomars composé de deux missions, soit

ExoMars 2016 composée de l'orbiteur Trace Gas Orbiter (TGO) et de l'atterrisseur expérimental Schiaparelli (2016), suivi par l'ambitieuse mission ExoMars 2028 avec l'astromobile Rosalind Franklin prévu vers 2028 muni d'une foreuse capable d'extraire et d'analyser des échantillons extraits du sous-sol martien jusqu'à 2 mètres de profonde. Ses missions ont comme objectif principal de faire des expériences d'exobiologie à la recherche de molécules organiques, et de chercher des traces de vie passée ou présente sous la surface de Mars. Après avoir suivi la piste de l'eau, il est temps maintenant de suivre la piste du vivant.

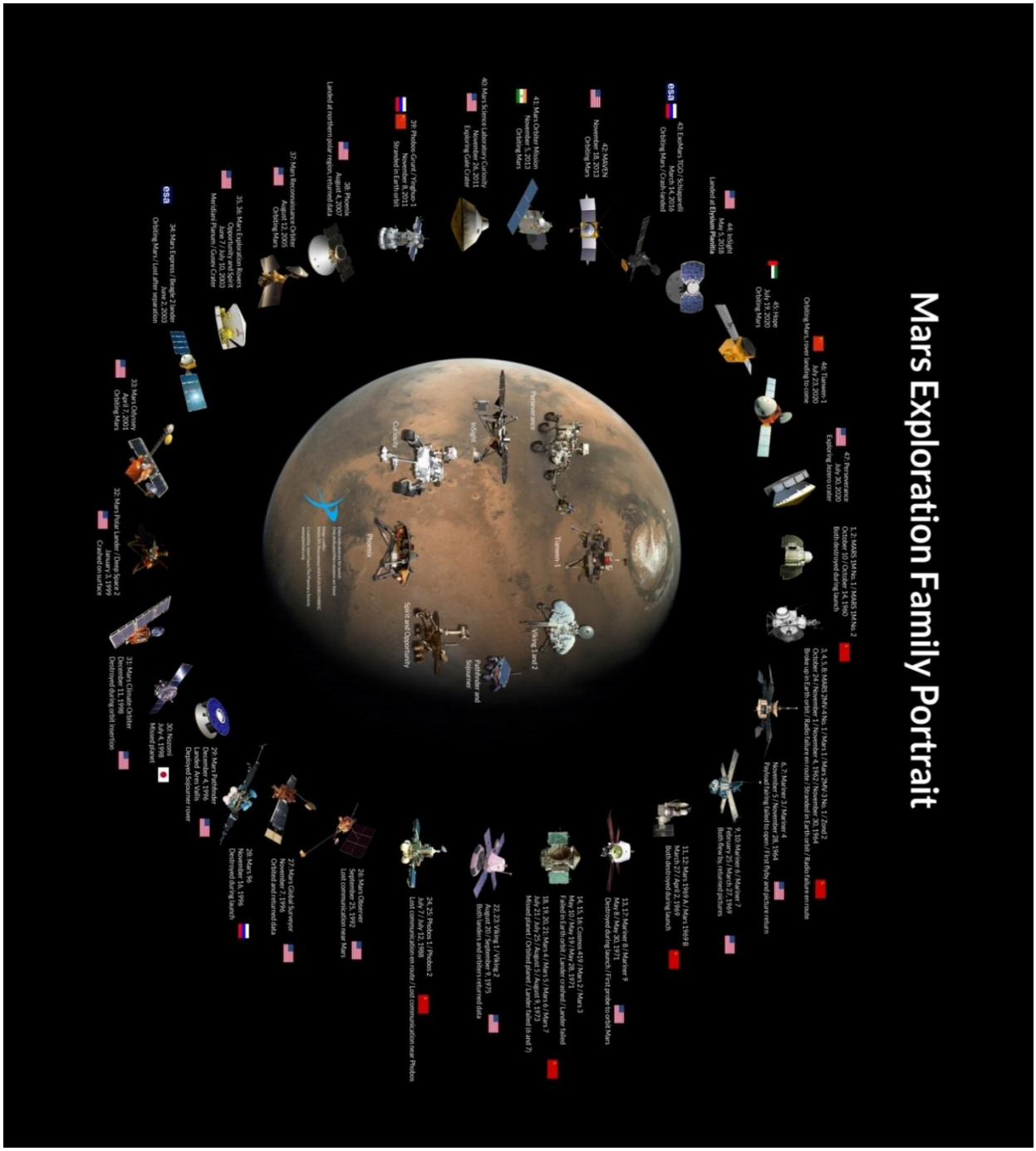


Figure 2 : Portrait de famille de l'exploration Martienne.
(Crédit : NASA/Roscosmos/JAXA/ESA/ISRO/Created by Jason Davis)

Vous pouvez retrouver les montages et les cartes de l'auteur sur le site flickr de partage de photos et de vidéos suivant :
https://www.flickr.com/photos/197507863@N02/

LES PANORAMIQUES DE MSL-CURIOSITY

Figure 1 : Les générations des rovers (Crédit : NASA)

La mission spatiale américaine MSL (Mars Science Laboratory), développé en 2003 par le centre JPL (Jet Propulsion Laboratory) de l'agence spatial américaine de la Nasa en collaboration avec plusieurs autres pays, était équipée d'un astromobile (rover) baptisé Curiosity. Il s'agit de la troisième génération de sonde mobile à pouvoir fouler et rouler sur la surface de la planète Mars (Figure 1). La mission principale de l'astromobile, d'une durée initiale de deux ans et pouvant franchir une distance de 20 km, était de mieux comprendre l'histoire physico-chimique, géologique et climatique de la région, et ceci afin d'évaluer l'habitabilité passer et présente autour du site d'atterrissage. Le but était de déterminer si les conditions que l'on estime nécessaire à l'apparition de la vie ont déjà existées à la surface de la planète. L'astromobile Curiosity était un véritable petit laboratoire roulant qui embarquait à son bord plus d'une dizaine d'instrument scientifique très sophistiqué. Trente six ans après l'extraordinaire réussite des missions Vikings, et huit ans seulement après le très grand succès de la mission MER et des rovers Spirit et Opportunity. L'homme était de retour à la surface de la planète Mars pour y faire des recherches in situ, et pour rechercher d'éventuelle trace de vie.

Figure 2 : Départ de MSL-Curiosité (Crédit : NASA)

MSL-Curiosity fut lancé du Cap Canaveral en Floride le 26 novembre 2011 à 15h02 TU (temps universel) par une fusée Atlas V (Figure 2). Le module de croisière (Figure 3:a) arrive près de la planète Mars après une longue traversée de plus de 570 millions de kilomètres parcourus en 36 semaines (7 mois et 10 jours) dans le vide et la froideur de l'espace interplanétaire. Curiosity était quatre fois et demi plus lourds (899 kg) que ses prédécesseurs Spirit et Opportunity (175 kg), et pour cette raison il a fallut développer une nouvelle technologie d'atterrissage pour garantir la réussite de la mission. Le module d'atterrissage de Curiosité était équipé d'un parachute hypersonique de 21,5 mètres de diamètre attaché à un bouclier arrière (Back Shell), dans lequel était fixé une sorte de grue aéroportée (Sky Crane) muni de huit rétrofusées, et sous lequel étaient fixés l'astromobile et le bouclier thermique avant (Heat Shield) de 4,5 mètres de diamètre. Les commandes d'entrée dans l'atmosphère et pour l'atterrissage sont données le lundi 6 août 2012. La séquence automatique débute par le largage de l'étage de croisière à une altitude de 1850 km. Dix minutes plus tard, à une altitude de 125 km de la surface, débute la séquence de freinage atmosphérique qui portera la température du bouclier thermique avant (Heat Shield) à

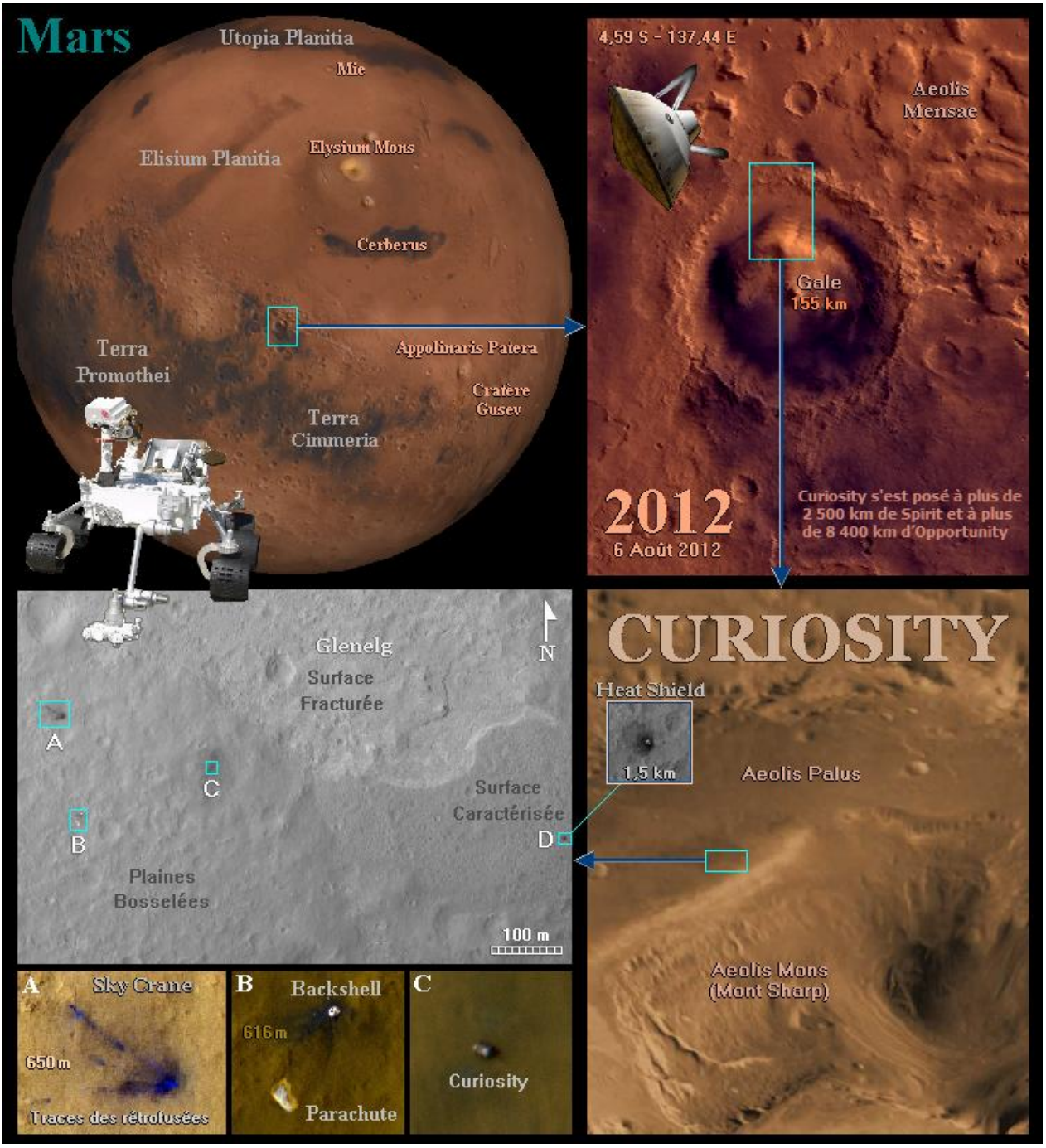


Planche 1 : Le site d'atterrissage de l'astromobile Curiosity obtenu grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) en août et septembre 2012. Les 2 photos du haut ayant participées au montage de cette maquette proviennent des orbiteurs Vikings.

plus de 1 500 °C. L'ouverture du parachute est déclenchée quatre minutes plus tard à une altitude de 10,6 km et ayant atteint une vitesse de Mach 2. Le bouclier thermique avant (Heat Shield) est éjecté vingt-quatre secondes plus tard à une altitude de 8 km, et il va aller s'écraser à 1,5 km au sud-est du site d'atterrissage de Curiosity. Une minute et 26 secondes plus tard, rendue à une altitude de 1,6 km, c'est le tour du parachute et du bouclier arrière (Back Shell) a êtres éjectés, soit juste après que la grue aéroportée (l'étage de descente) est allumé ses huit rétrofusées pour

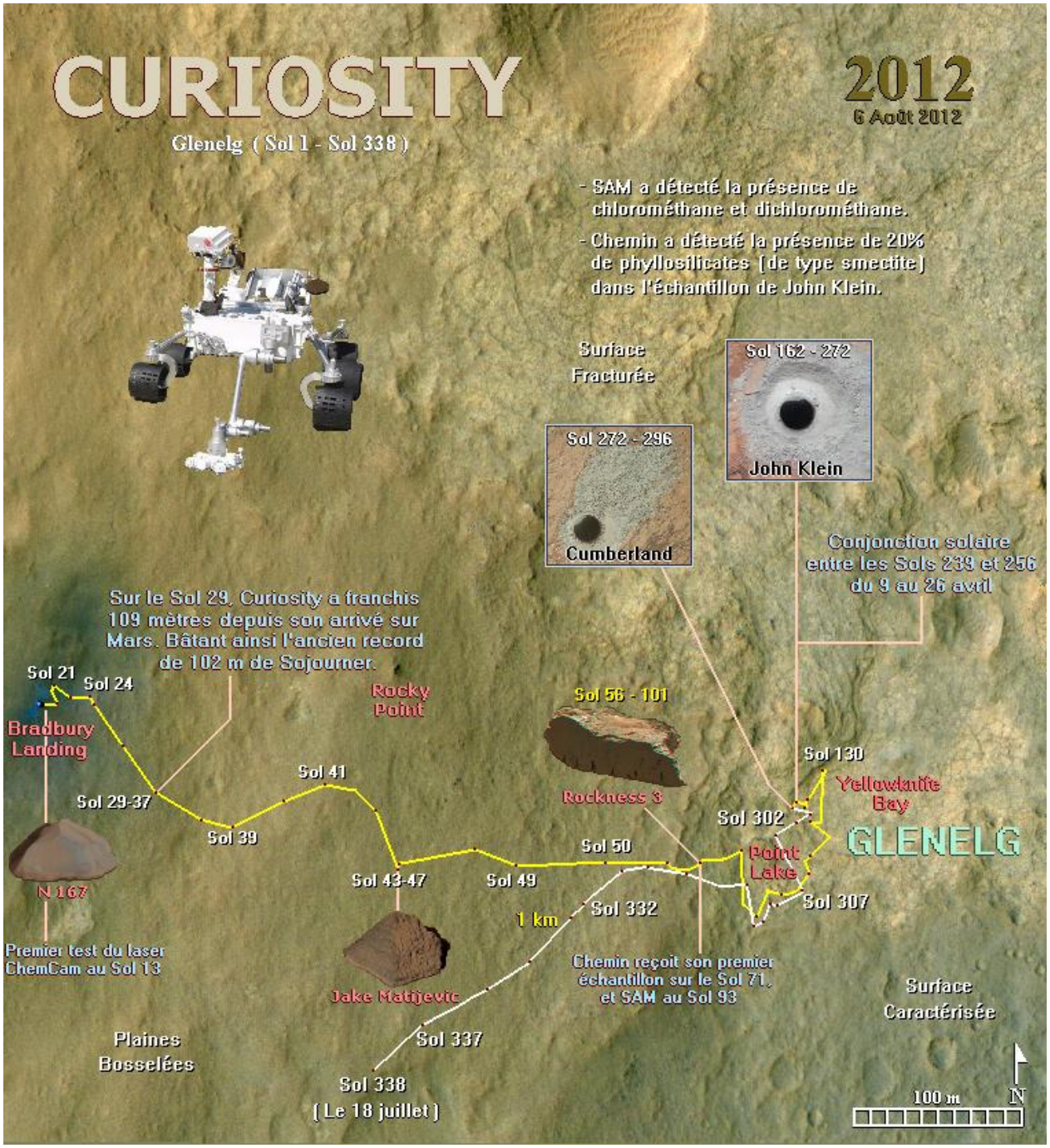


Planche 2 : Trajet de Curiosity entre les Sols 1 et 338 (environ 1 101 mètres entre le 12 août 2012 et le 19 juillet 2013). La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournit par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) en août 2012. Position et trajet du rover guidé par les cartes de la Nasa et de Phil Stooke.

amortir la vitesse de descente. Le parachute et le bouclier arrière irons tout les deux percuter le sol à seulement 615 mètres au sud-ouest du site d'atterrissage. La grue aéroportée (Sky Crane) va prend le relai jusqu'à une altitude d'une vingtaine de mètres au-dessus du sol. L'astromobile qui est toujours relié à la grue aéroportée (Sky Crane) par trois câbles de 7,5 mètres, est alors expulser vers l'extérieur en glissant le long des trois câbles. L'astromobile Curiosity qui est maintenant suspendu dans les airs, déplies ensuite son train roulant composée de six roues

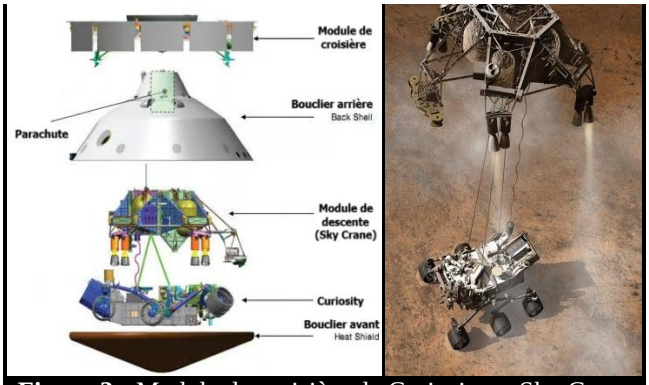


Figure 3 : Module de croisière de Curiosity et Sky Crane (Crédit : NASA)

motrices de 50 cm de diamètre montée sur une suspension à bogie à bascule avec lesquels il va se poser directement sur le sol martien. Le contacte avec le sol s'effectue seize secondes plus tard à 5h31 UTC (soit vers les 15 heures, heure locale de Mars), et les câbles sont aussitôt détachés pour permettre à la grue aéroporté de s'éloigner et d'aller s'écraser plus loin à la surface de la planète rouge (Figure 3:b), soit à plus de 650 mètres au nord-ouest du site d'atterrissage de Curiosity. Le rover mesure 2,9 mètres de long par 2,7 mètres de large et de 2,2 mètres de haut.

Le site d'atterrissage, qui a été sélectionné en juillet 2011 à cause de ses énormes dépôts sédimentaires stratifiés de plusieurs kilomètres de haut, riche en argile et en sulfate avec des traces évidentes d'écoulement sur ses flancs, se trouve tout juste à la limite des hauts plateaux cratérisés du Sud et des bases plaines du Nord. Il est situé à 4,59° de latitude Sud par 137,44° de longitude Est à −4501 mètres d'altitude à l'intérieur du grand cratère d'impact « Gale » de 154 km de diamètre, et âgé d'environ 3,6 milliards d'années à la limite inférieur du Noachien/Siderikien. Au centre du cratère se trouve un pic dénommé « Aeolis Mons » ou mont « Sharp », qui culmine à plus de 5 km de hauteur sur environ 80 km de large (Planche 1), dont la base entourée de dunes sombres se trouve à plus de six kilomètres du site d'atterrissage, qui sera par la suite baptisé « Bradbury Landing ». Curiosity s'est posé à plus de 2 500 km à l'ouest du site d'atterrissage du rover Spirit et à plus de 8 400 km à l'est du site du rover Opportunity.

L'équipement scientifique du rover

L'astromobile Curiosité était équipé d'un RTG (générateur thermoélectrique radio isotopique) pour son alimentation en énergie (Figure 4). Il s'agit d'un générateur nucléaire qui fonctionne sur le principe du transfère de chaleur par thermocouples, et qui utilise comme combustible du dioxyde de plutonium (PuO_2) enrichie de plutonium 238. La différence de température entre deux conducteurs génère un différentiel de tension qui est convertie en courant électrique, et qui est par la suite stockée dans deux batteries rechargeables au lithium. L'excédant de chaleur produit par la désintégration du plutonium, est ensuite récupéré et distribué à l'intérieur du rover pour le réchauffé, par un système de radiateur ou circule un fluide caloporteur à travers une canalisation

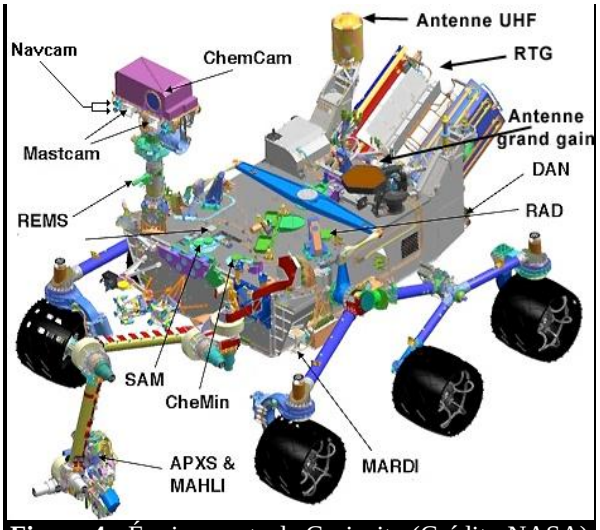


Figure 4 : Équipements de Curiosity (Crédit : NASA)

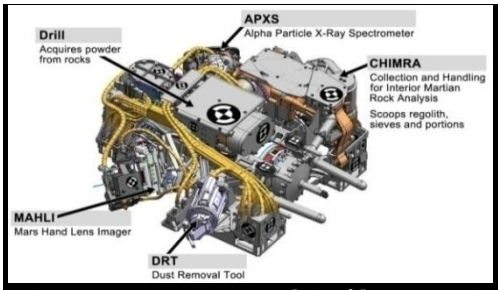


Figure 5 a : Le porte outil (Crédit : NASA)

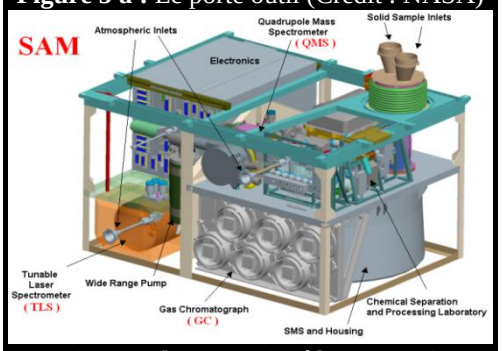


Figure 5 b : SAM (Crédit : NASA)

constituée de plus de 50 mètres de tubes. Le RTG du rover est capable de générer une puissance électrique nominale de 2,7 kilowatts par jour durant les deux première années de sa mission sur Mars, soit plus de trois fois la puissance électrique des rovers Spirit et Opportunity au début de leurs missions sur Mars en 2004. L'astromobile sera donc beaucoup moins soumis aux aléas météorologiques de la planète Mars que ses aînés, dont les panneaux photovoltaïques se couvraient régulièrement de fines poussières martiennes. Curiosity dispose d'une source d'énergie fiable, et l'astromobile pourra sans difficulté poursuivre sa mission et ses analyses de sol sans vraiment se préoccupé de la température, de la saison, de l'ensoleillement et des tempêtes de sable. L'astromobile était également équipé de dix-sept caméras en tout, dont sept étaient fixées sur le mât du rover. Pour plus de sécurité, chaque paire de caméras du système de navigation (NavCam et HazCam) avait été reliée à un système informatique différents, équipé chacun d'un ordinateur avec un microprocesseur RAD750 de 200 MHz (Power PC), avec une mémoire volatile (mémoire vive dynamique DRAM) de 250 MB et d'une mémoire flash permanente de 2 GB renforcée contre les radiations. Il s'agit de deux paires de caméras de navigations NavCam, qui se trouvent fixées de chaque côté du mât. De deux caméras couleur MastCam (Mast Camera) de haute définition à focale fixe, et disposant chacune d'un dispositif à roulette qui contient huit filtres différents permettant l'imagerie multispectrale et la création de spectres de réflectance calibrés dans 12 longueurs d'onde uniques, comprises entre environ 400 et 1 100 nm. Soit une caméra à grand angle qui est situé à gauche avec un focal de 34 mm, et la caméra de droite avec un téléobjectif de 100 mm. Et situé tout au sommet du mât on retrouve l'instrument ChemCam (CHEMistry CAMera), qui est muni d'une petite caméra de contexte haute résolution (remote micro-imager, RMI) capable de prendre des images monochromes, d'un petit télescope de 11 centimètres de diamètre avec un objectif de 110 mm reliés à l'instrument par fibres optiques, du laser pulsé infrarouge français de 1 067 nm (un faisceau laser composé de 30 impulsions de 5 nanosecondes chacun est tiré sur une cible) qui est couplé par une fibre optique de 6 m à trois spectromètres (ultraviolet (240-342 nm), bleu (382-469 nm) et visible (474-906 nm)), qui se trouve bien à l'abri dans le corps du rover.

ChemCam marque la première utilisation de la spectroscopie de claquage induit par laser (LIBS) sur Mars pouvant déterminer à distance l'état d'altération et d'hydratation de la composition minéralogique et chimique des roches. Il est le premier instrument à faire des analyses, et sert entre autre à évalué l'intérêt des échantillons de sol martien avant l'utilisation des autres instruments pour effectuer des analyses plus poussées. Le système de navigation est assisté par quatre paires de caméras d'évitements d'obstacles de proximité HazCam (Hazard Avoidance Caméras), deux paires sont fixées à l'avant (Front) et deux autres à l'arrière (Rear) sous le châssis de l'astromobile. Le rover était également équipé d'une caméra microscopique couleur de 2 mégapixels focalisable MAHLI (Mars Hand Lens Imager), qui était monté sur le porte outil situé au bout du bras robotique du rover (Figure 5:a), et de deux mini laboratoires d'analyse physico-chimique logés dans le corps avant de Curiosity. Soit CheMin (Chemistry &

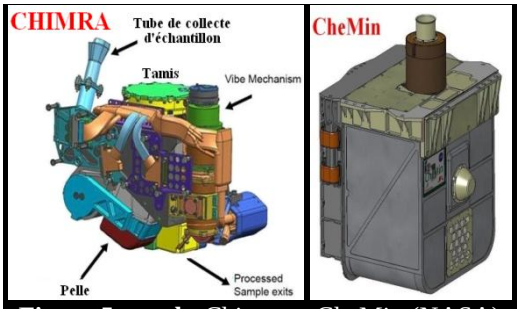


Figure 5 c et d : Chimra et CheMin (NASA)

Mineralogy), constitué d'un spectromètre à diffraction et à fluorescence X pouvant effectuer l'analyse chimique et minéralogique des minéraux, des matériaux carbonaté et des évaporites (Figure 5:d). CheMin bombarde de rayon X un échantillon contenu dans une petite capsule, et analyse par la suite le rayonnement X et la fluorescence qui est émis par la cible. Le deuxième mini laboratoire est SAM (Sample Analysis at Mars), fournis en collaboration avec les USA et le CNRS. Il s'agit d'un mini laboratoire qui est composé de trois instruments scientifiques différents (Figure 5:b), dont la principale tache est d'effectuer des analyses de la composition chimiques et isotopiques de l'atmosphère ou sur des éléments organiques contenue dans les échantillons de sol ou de roche (analyses de gaz évolué - evolved gas analysis ou EGA). Contrairement à CheMin, qui était assisté dans son travail par un carrousel comprenant 32 petites capsules réutilisable. SAM avait à sa disposition un petit carrousel SMS (Sample Manipulation System), hébergeant une roue de 74 coupelles et de deux petits fours pouvant chauffée (950 et 1100 °C), et trois spectromètres différents qui analysent les gaz émis après chauffage. Soit un chromatographe en phase gazeuse (SAM-GC), dont l'objectif est de séparer les molécules organiques complexes selon leurs masses, un spectromètre de masse quadripolaire (SAM-QMS) pour identifier les éléments chimiques (GC couplé QMS forme le GC-MS), et un spectromètre accordable à absorption laser réglable (SAM-TLS) pour identifier les isotopes. Ses trois spectromètres étaient capables de rechercher la matière organique et l'eau en analysant les isotopes du carbone et de l'oxygène contenue dans le dioxyde de carbone, et il sera également utilisé pour mesurer l'origine des traces de méthane. Les échantillons sont introduit dans une chambre de préparation, ou pouvait avoir lieu une pyrolyse ou un chauffage moindre avec possibilité d'ajouté des réactifs liquide selon le type d'expérience, avant d'être acheminée pour êtres analysés par les différents spectromètres de l'instrument SAM.

Parmi les autres instruments scientifiques embarqués à bord, il y avait le spectromètre canadien APXS (Alpha-Particle X-ray Spectrometer) à rayon X et particule alpha situé sur le porte outil du rover (tourelle rotative), utilisant le curium 244 comme source de rayon X. Cet instrument sert à mesurer l'abondance élémentaire des éléments chimique lourds partant du sodium au brome contenue dans les échantillons de sol et de roches. Le fonctionnement de l'APXS de Curiosity était semblable aux instruments qui équipaient le rover Sojourner de la missions Mars Pathfinder de 1997 et des rovers Spirit et Opportunity de la mission MER de 2004, avec cependant une sensibilité qui a été nettement amélioré par un facteur trois. Le robot était également équipé d'une petite station météorologique espagnole REMS (Rover Environmental Monitoring Station), composée de différents instruments fixées à différents endroit sur le rover et servant à mesurer la pression, l'humidité, la température et la vitesse des vents. D'un détecteur de particules énergétiques RAD (Radiation Assessment Detector) développé en collaboration avec l'Allemagne, qui mesure les radiations solaires et cosmiques qui parviennent jusqu'au sol. Du spectromètre à neutrons DAN (Dynamic of Albedo Neutrons) fournis par les Russe, qui sert à mesurer la dispersion des neutrons dans le sol. Cet instrument est chargé d'identifier la présence et l'abondance de l'hydrogène et de l'eau contenue dans le premier mètre du sous-sol martien, et il est également utilisé pour aider à dresser une carte du profile d'inertie thermique des terrains parcourus par l'astromobile. En plus de tous ses instruments, le robot était équipé d'une caméra de descente MARDI (MARs Descent Imager) monté sous le châssis du rover, et qui réalise avant l'atterrissage des photos de la zone environnante et pouvant prendre à l'occasion des images

situées sous le robot durant la mission. Le porte outil rotatif du bras robotique du rover long de 1,9 mètre était également équipé d'une foreuse, ou perceuse à percussion rotative PADS (Powder Acquisition Drill System) muni d'une mèche de 1,6 cm de large, permettant de forer un trou de 1,6 cm de diamètre sur 5 cm de profondeur, assisté par une brosse motorisée à poils métalliques DRT (Dust Removal Tool) pour polir et nettoyer la surface des échantillons. Et pour finir l'énumération des instruments de la tourelle rotative, nous retrouvons CHIMRA (Figure 5:c) pour la manipulation et le traitement des échantillons vers CheMin et SAM équipé d'un tamis et d'un godet de 3,5 cm de profondeur.

Pour transmettre l'énorme quantité de données vers la terre, le rover Curiosity avait à sa disposition trois antennes de communication. Soit une antenne fonctionnant en bande UHF, utilisée pour la communication de courte portée avec les sondes en orbite autour de la planète Mars (Mars Odyssey et MRO). Et de deux antennes fonctionnant en bande X utilisant la plage de fréquence d'onde radio de 8 gigahertz, et qui étaient utilisées pour les communications à longue distance directement avec la terre. Une antenne omnidirectionnelle à faible gain (LGA) et une antenne à grand gain (HGA) en forme d'hexagone plat développée par l'Espagne et qui permettait des débits plus importants, mais cette dernière devait être orientée et alignée avec précision vers la terre. Les antennes sont fixées à l'arrière du pont supérieur du rover.

En route vers Glenelg (Sol 1 à 338)

Figure 6 : Premier panorama de Curiosity pris entre les Sols 2 et 3 (Crédit : NASA/JPL/Caltech/Damia Bouic)

Les premiers jours de la mission seront tous consacrés au bon déploiement des différents instruments et outils scientifique de l'astromobile, et pour tester les différents logiciels du système de navigation de Curiosity. Le rover transmet la première image en noir et blanc du sol martien, prise à l'aide de la caméra d'évitement d'obstacle HazCam arrière, seulement quelque seconde après avoir toucher le sol martien. La première image panoramique en noir et blanc de 360° du paysage martien a été prise par les caméras NavCam à partir du Sol 2 le 8 août (Figure 6). Tout comme les images fournies par les missions martiennes précédentes, les premières images du site d'atterrissage dévoilent un paysage aux teintes rouges jonché de roche et de pierres éparpillées sur un sol aride et sec. Mais contrairement aux missions antérieures, le paysage du site d'atterrissage de Curiosity est appauvrit en roches de grandes tailles. Au centre de l'image on retrouve le mont « Sharp » en forme de dôme, qui surmonte un grand champ de dunes de sable sombre qui se trouve juste à sa base. De chaque côté du mont « Sharp », nous pouvons apercevoir les parois intérieurs de l'énorme cratère d'impacte « Gale » situées à plus de 28 km de distance. Le premier panorama haute résolution en vrai couleur de 360°, composé d'une mosaïque de 130 images plus petites prise à l'aide de la caméra MastCam de gauche (34 mm),

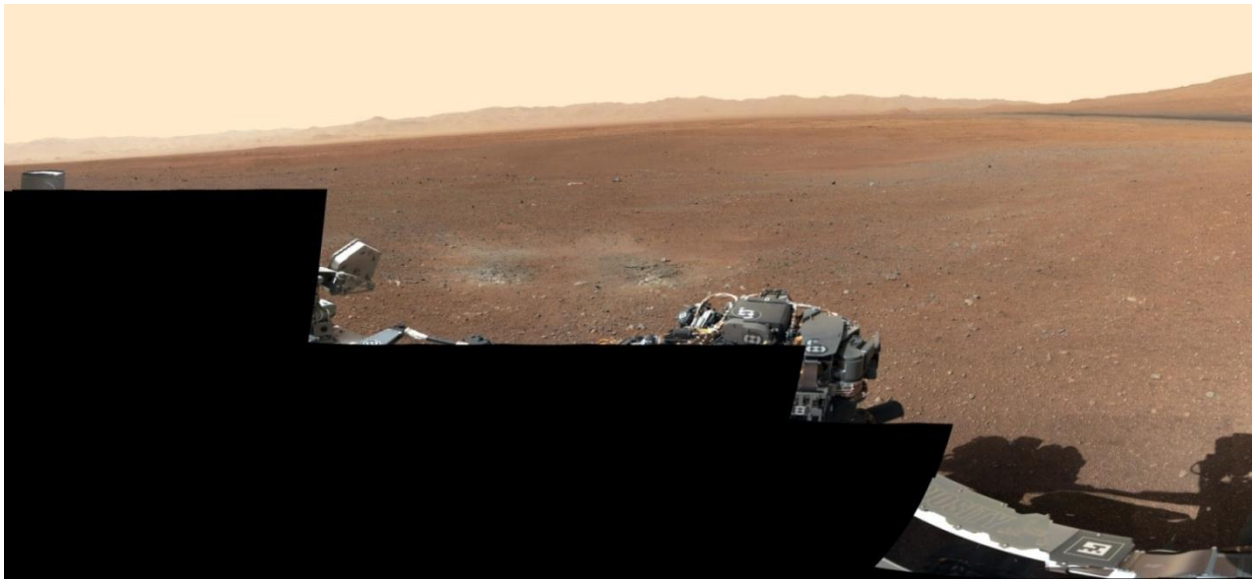


Planche 3 : Premier panorama couleur de 360° pris entre les Sols 3 et 13 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

commence à parvenir à la terre à partir du Sol 3 jusqu'au Sol 13 (Planche 3). Les deux traces claire situées de chaque côté de l'image, sont le résultat du souffle des rétrofusées qui ont balayé la fine couche de poussière martienne qui recouvrait du gravier.

Sur le Sol 13 le 19 août, le laser français ChemCam a été testé pour la première fois sur une cible de roche basaltique dénommée N165 ou « Coronation », qui est visible dans la partie centre gauche de l'image de droite de la planche 3. Le faisceau laser pulsé de ChemCam qui a frappé 30 fois sa cible pendant 10 secs, a transformé la matière visée en un gaz ionisé chauffé à plus de 8 000 °C. L'optique de ChemCam est équipée d'un petit télescope qui récupère ensuite le spectre lumineux du plasma induit par laser émise par l'échantillon pour l'analyser à l'aide d'un spectromètre. Les mesures fournis par la station météorologique espagnole REMS pour les deux première semaines de la mission, indique une température journalière moyenne pouvant varier entre +2 le jour à –75 degrés Celsius la nuit. Le rover Curiosity quitte définitivement son site

Figure 7 : Départ de Curiosity au Sol 16, après avoir parcourus 7 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Figure 8 : Sol 24, après un parcours de 14 mètres exécuté en 3 Sols de conduite (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Planche 3 : Suite du panorama couleur pris entre les Sols 3 et 13.

d'atterrissage « Bradbury Landing », et roule pour la première fois sur le sol martien au Sol 16 le 22 août. L'astromobile franchis une courte distance de 4,5 mètres vers l'est, puis il effectue ensuite un virage de 120 degrés avant de parcourir 2,5 mètres supplémentaire vers le nord-est (Figure 7). La distance parcourus indiquée dans les figures des images panoramiques, est calculée en fonction des séances de conduite quotidienne effectuée à partir de la figure de l'image panoramique précédente. L'astromobile se dirige ensuite vers le Sud au Sol 24 (Figure 8) pour aller étudier l'une des traces laissé sur le sol par les rétrofusées lors de l'atterrissage dénommé « Goulbum Scour ». Le robot se remet en route vers l'est au Sol suivant le 31 août 2012 après avoir tester sur une courte distance la conduite en mode automatique, afin de se diriger vers sa nouvelle cible d'intérêt géologique baptisée « Glenelg ». Il s'agit d'une sorte de carrefour naturel qui est situé à plus de 400 mètres à l'est de la zone d'atterrissage, ou se chevauche trois types de terrain géologiques différents composée d'une alternance de strates sédimentaires (triple jonction). Il s'agit en premier lieu de l'unité bosselée qui caractérise le type de terrain du site d'atterrissage, suivit de l'unité cratérisée située dans la partie sud et de l'unité stratifiée et fracturée caractérisée par sa forte relation avec un système fluvial situé au nord (Figure 13:b). « Glenelg » se trouve tout juste à l'extrémité sud-est d'une ancienne zone d'origine fluviale, dont la source semble provenir d'une région située à plus d'une vingtaine de kilomètres au nord-ouest du site d'atterrissage. La zone d'écoulement fluviale aurait par la suite franchis les parois intérieures du cratère « Gale », en s'écoulant vers le sud-est à travers une série de petits canaux qui se sont déversés dans la vallée profonde « Peace Vallis », avant de s'étaler par la suite sur le plancher du cratère « Gale » en direction de « Glenelg » en laissant derrière des dépôts sous forme de cône alluvial de déjection.

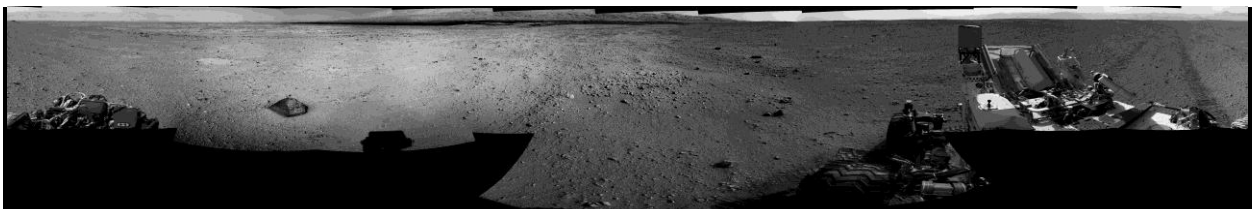


Figure 9 : Jake Matijevic au Sol 43, après 263,8 mètres en 8 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

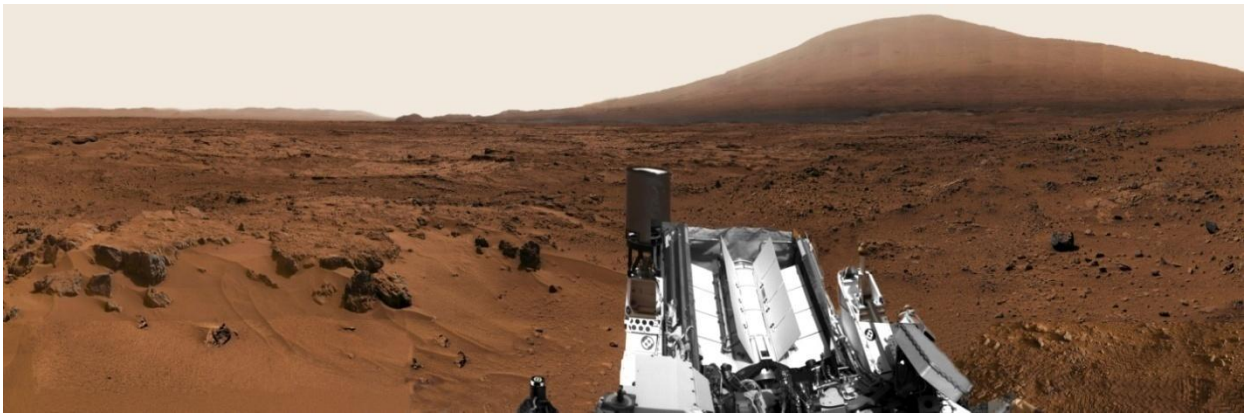


Planche 4 : Panorama Rocknest pris entre les Sols 58 et 100 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 10 : Jake Matijevic (Crédit : NASA/JPL/Caltech/MSSS)

Curiosity se déplace sur le terrain en zigzagant à travers la plaine martienne environnante durant les Sols suivants, tout en étudiant à l'occasion des cibles de roches qu'il croise sur sa route avec les différents instruments du porte outil situé à l'extrémité de son bras robotique. Il s'agit entre autres des affleurements rocheux « Link » et « Hottah » rencontré entre les Sols 26 et 38, constitué de conglomérats sédimentaires encastrés dans la roche et composé de galets et de graviers de forme arrondie d'environ 4 cm de diamètre. La taille et la forme arrondie du gravier et des galets observées à cet endroit, est une preuve solide d'une érosion causée par l'écoulement d'une certaine quantité d'eau dans un milieu aqueux et ayant persisté durant une bonne période de temps, et non celle causée uniquement par l'action érosive et abrasif du vent. Le rover se déplace ensuite vers l'est et parcours plus de 150 mètres en cinq Sols de conduite avant de rejoindre la roche basaltique baptisée « Jake Matijevic » (Figure 9 et 10) de 25 cm de hauteur sur 40 cm de largeur, dans le but de l'étudier plus en détaille entre les Sols 43 et 47 (du 19 au 23 septembre 2012) avec son spectromètre APXS et son imageur microscopique MAHLI.

L'astromobile a franchis une distance de 484 mètres depuis son départ du site d'atterrissage (Sol 16) jusqu'au Sol 56 le 2 octobre, ou il arrive à la hauteur du site de travail dénommé « Rockness » (Sols 56-101), que l'on peut voir dans la partie supérieure de la figure 9 à gauche de « Jake Matijevic » et en bas vers le centre de l'image de droite de la planche 4. La planche 4 est composée d'une mosaïque de 850 images de la MastCam prises entre les Sols 58 et 100 entre le 5 octobre et le 16 novembre 2012, la vue est centrée vers le sud avec le nord aux deux extrémités. Il s'agit d'un site parsemé de petites dunes composée de sable fin entouré par de gros cailloux, et qui se trouve à seulement 25 mètres au pied de « Glenelg ». Le rover va étudier la région autour de « Rockness » durant les prochain 45 Sols, le temps de faire une analyse complète des lieux avec ses différents instruments scientifiques. Curiosity va rechercher à mieux comprendre les propriétés physique et la composition chimique des échantillons de sol et de roches, pour faire ressortir des indicateurs concernant les processus d'érosion, d'altération et de transport qui ont modifier le climat et le visage de la surface martienne au cours des temps géologiques. La recherche de minéraux hydratés dans la diversité des grains de sol et des roches, va permettre de mieux cerner l'évolution du cycle de l'eau sur la planète au cours du temps, et nous donner une idée sur l'évolution des conditions d'habitabilité qui ont régné sur la planète au

Planche 4 : Suite du panorama Rocknest

cours de sa longue histoire géologique.

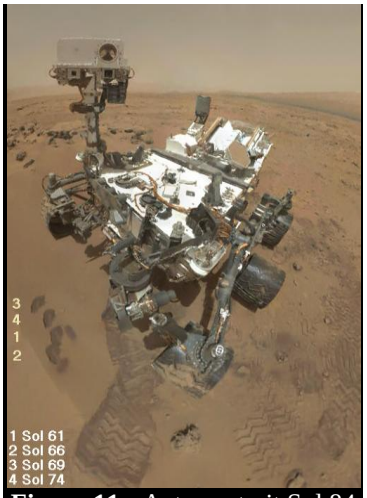


Figure 11 : Auto portrait Sol 84 (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

La première cible de cette vaste campagne d'étude sera la roche « Rockness 3 » de 40 cm de long sur 10 cm de haut, que l'on peu voir vers le centre-bas de l'image de droite de la planche 4, et qui sera étudié par le laser de ChemCam au Sol 57. La roche sera étudiée à 30 reprises par le laser ChemCam, totalisant plus de 1 500 tirs de laser avant d'être étudié par le spectromètre APXS. Les analyses chimiques APXS de Rocknest sont similaires aux analyses réalisées par les rovers MER à Meridiani Planum et Gusev, ce qui suggère un sol de même nature. La mini pelle (godet) est testé pour la première fois sur le Sol 61, lors de la première pelleter d'un échantillon de sol martien effectué grâce au basculement de la tourelle. Les deux premières pelleter effectuées aux Sols 61 et 66, vont servir pour nettoyer et décontaminer le système d'échantillonnage CHIMRA. Le mini laboratoire d'analyse chimique CheMin reçoit son premier échantillon de sol martien au Sol 71 le 18 octobre, dont les analyses spectroscopique ont dévoilées la présence de matériaux basaltique composé de feldspath cristallin, de pyroxènes, de magnétite et d'olivine mélangé avec un matériau amorphe. L'échantillon avait été récolté au Sol 69 le 16 octobre, lors du troisième teste de la pelle avant d'être livrer au mini laboratoire d'analyse chimique et minéralogique CheMin. Au Sol 74, le laser de ChemCam a été utilisé pour effectuer un tir en direction de la dune de sable d'ou provenait l'échantillon, creusant dans le sable un troue de 3 mm de diamètre, et ceci pour servir d'analyse complémentaire à celle de CheMin. Dix jours plus tard, un magnifique autoportrait de Curiosity composée de 55 images de haute définition a été effectué par la caméra MAHLI sur le Sol 84 (Figure 11), montrant la position du rover sur le site d'échantillonnage « Rocknest » avec les quatre empruntes sur le sable qui ont servis à la cueillette des échantillons. Après plusieurs opérations de nettoyage et de décontamination du système d'échantillonnage CHIMRA. Les premiers échantillons pour le mini laboratoire SAM sont livrés pour analyse aux Sols 93, 96, 99 et 117, provenant de différentes pelleter de terre. Les premiers résultats indiquent que les gaz libérés après le chauffage des grains de sables étaient de la vapeur d'eau (2%), du dioxyde de carbone (CO_2), de l'oxygène, du chlore et du dioxyde de soufre (SO_2), incluant la première détection confirmée de molécules organiques simples comme le chloroforme ($CHCl_3$), le chlorométhane (CH_3Cl) et le dichlorométhane ($C_2H_2Cl_2$).

Figure 12 : Sol 102, la vue donne sur Yellowknife Bay (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Figure 13 : Point Lake au Sol 106, après un trajet de 212,6 mètres en 12 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

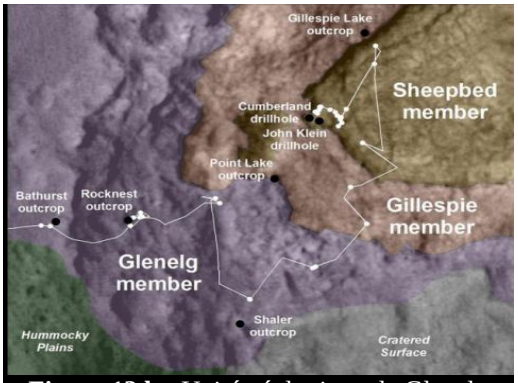


Figure 13 b : Unité géologique de Glenelg (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Le ciel de Mars devient un peu moins transparent à partir du Sol 100, causé par une hausse notable du tau de poussière en suspension dans l'atmosphère. Curiosity reprend sa route vers l'est en direction de « Yellowknife Bay » au Sol 102 le 18 novembre, en parcourant une distance de 25,3 mètres qui le conduit au site de « Point Lake » qui se trouve juste à l'entré de « Glenelg ». Le rover pointe ensuite ses caméras MastCams vers l'horizon et prend une image panoramique couleur du paysage martien qui se trouve en direction de « Yellowknife Bay » (Figure 12), que l'on peu voir au centre dans la partie supérieur de l'image. L'astromobile restera stationné durant dix-huit jours à cet endroit, avant de reprendre sa route sur le Sol 120. Ce temps d'arrêt est rendu nécessaire afin d'établir un nouvelle itinéraire de conduite pour le rover, et pour identifier des cibles potentiels pour le premier forage du robot sur Mars. Quatre jours plus tard sur le Sol 106 le 22 novembre, le rover prend un nouveau cliché panoramique couleur en haute définition de 360° des lieux avec ses caméras MastCams (Figure 13, après 12 Sols de conduite effectué depuis le départ de « Jake Matijevic » au Sol 47). Nous pouvons voir dans la partie gauche de l'image qui pointe vers l'horizon ouest, une partie de la région de « Glenelg » correspondant à la dépression peut profonde de « Yellowknife Bay ». Dans le haut de la partie centre-droite de l'image, qui donne vers l'horizon Est, nous pouvons voir avec un fort grossissement juste au dessus de l'antenne UHF du rover, le site qui correspond à « Rockness ». Après avoir étudié l'empilement oblique de fines lamelles sédimentaires qui compose l'affleurement « Shaler » au Sol 120 (Figure 14) d'environ 20 mètres de largeur sur 0,7 mètres d'épaisseur, et qui semble vouloir démontrer de par la grosseur des grains, que ce dernier se serait formé dans un courant aqueux. Les fines lamelles inclinées de « Shaler » semblent résulter d'une stratification verticale, dont le dépôt de sédiment se serait étalé horizontalement pour suivre les ondulations d'un fond marin de faible profondeur sous l'influence d'un faible courant fluviale.

Le rover fait son entré sur le site de « Yellowknife Bay» au Sol 125 le 12 décembre 2012, ou les mesures d'inertie thermique obtenus par la caméra Themis (thermique) de Mars Odyssey en septembre 2012 indique des valeurs plus élevées. L'inertie thermique mesure la résistance des

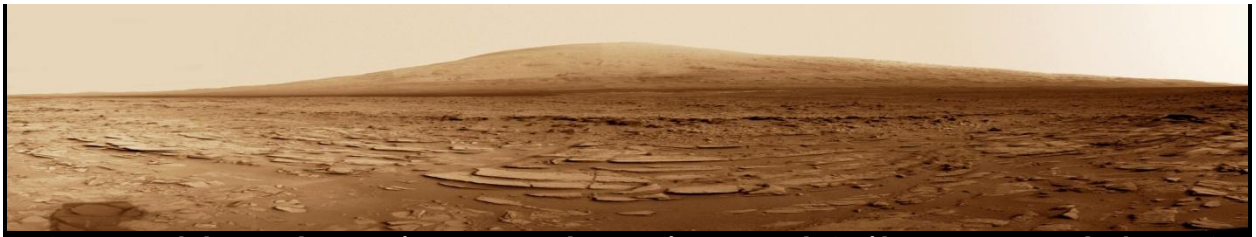


Figure 14 : Shaler au Sol 120, après un parcours de 32,7 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

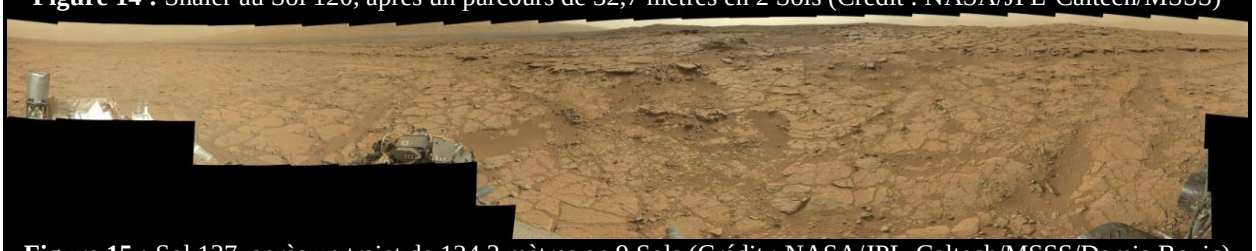


Figure 15 : Sol 137, après un trajet de 124,3 mètres en 9 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

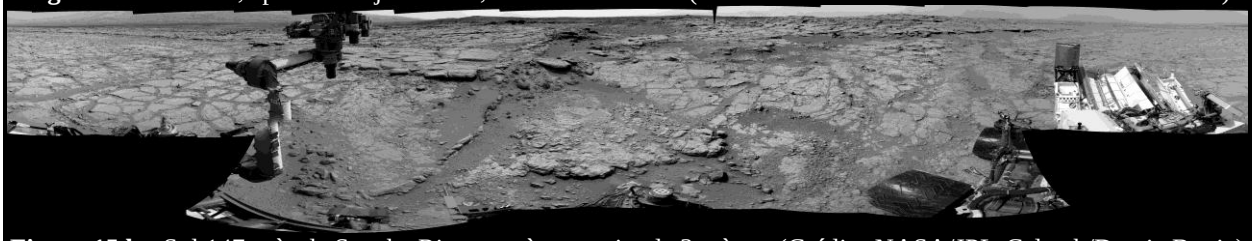


Figure 15 b : Sol 147 près de Snacke River, après un trajet de 3 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

matériaux aux changements de température, indiquant que le sol plus claire situé à cet endroit est plus hydraté et il retient plus la chaleur la nuit tombée que les terrains avoisinants plus sombres. L'inertie thermique de cette région martienne a également été confirmée par l'instrument météorologique REMS (Rover Environmental Monitoring Station) embarqué sur l'astromobile. Il s'agit d'une dépression géologique peu profonde ayant la forme d'une cacahouète de teinte claire qui se trouve à l'extrémité sud d'une pente descendante, ou c'est formé un ancien cône de déjection aqueux qui a déposé des débris qui ce sont étalés sous forme d'éventai. L'analyse spectrale des roches « Crest » et « Rapitan » effectuée au Sol 125 par le laser de ChemCam, a dévoilé la présence de sulfate de calcium hydraté entrant dans la composition minéralogique des petites veines blanchâtres qui parcourt les roches à leur surface. La présence de minéraux argileux et de sulfate de calcium dans la région de « Glenelg », suggère fortement une interaction avec un environnement passé aqueux qui devait être beaucoup plus humide avec un ph neutre à légèrement alcalin, contrairement au site de« Rockness » qui devait être plus sèche. L'hydratation d'un minéral est caractérisée par la présence d'ion (OH^-) dans sa structure chimique, et les argiles sont formées par le lessivage de matériaux basaltique comme l'olivine en présence d'eau neutre ou faiblement alcaline. Leur détection sur Mars est favorable à la présence d'un habitat potentiel pour l'évolution et le développement de la vie à une époque géologique très ancienne, qui remonterait au tout début de l'histoire martienne. Sur Terre, les minéraux argileux sont associés à la préservation de la matière organique pendant de longues périodes, notamment lorsqu'ils se déposent rapidement dans des environnements anoxiques tels que les lacs.

Au Sol suivant, le rover photographie avec l'imageur MAHLI de ChemCam les veines blanchâtres qui se trouvent sur la roche « Sheepbed » (Figure 16). Les nodules identifiés dans « Sheepbed » sont divisés en trois types, soit les nodules solides, nodules creux et nodules remplis. L'espace vide des variantes de nodules creux sont remplis de minéraux de sulfate. Le

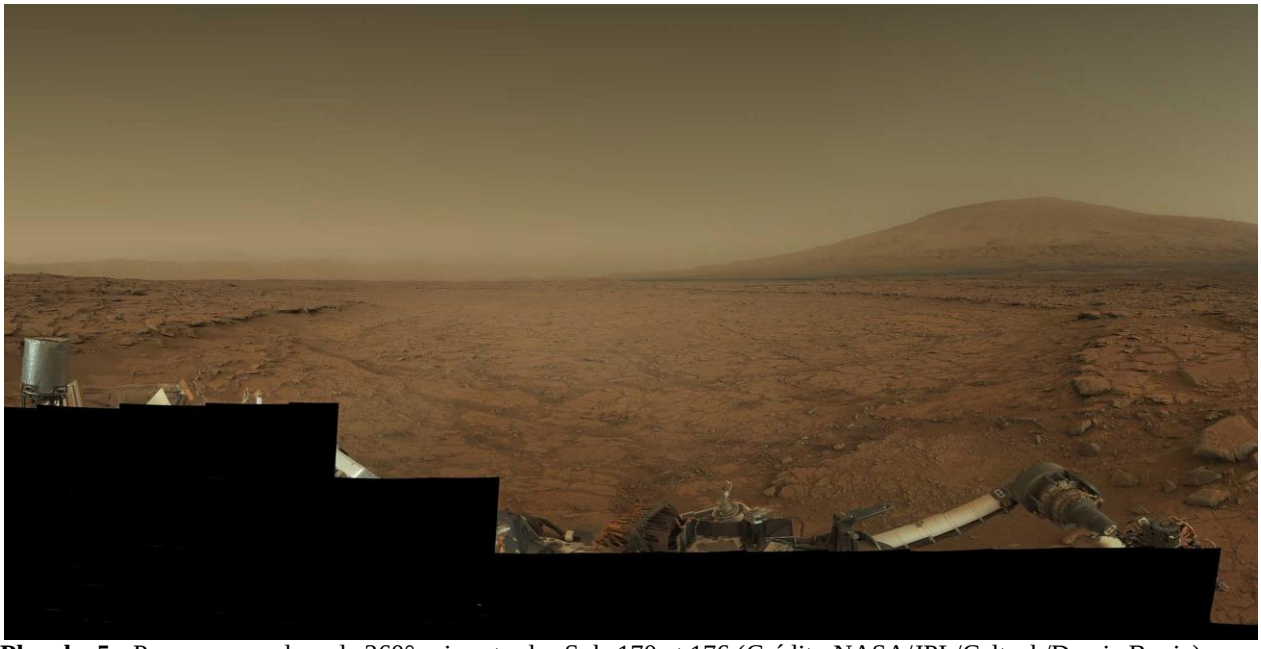


Planche 5 : Panorama couleur de 360° pris entre les Sols 170 et 176 (Crédit : NASA/JPL/Caltech/Damia Bouic)

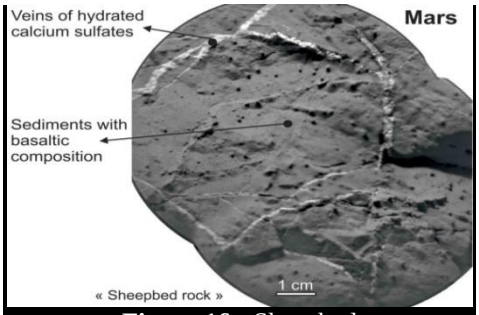


Figure 16 : Sheepbed
(Crédit: NASA/JPL-Caltech/LANL/CNES)

Figure 17 : Tintina
(Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS)

sulfate de calcium, sous forme de gypse ou de basanite, a également été détecté dans les veines blanchâtre de la roche « Knorr » au Sol 133 le 20 décembre 2012. La présence de gypse montre que de l'eau chargée en sulfate à bel et bien circuler à cet endroit. Curiosity prend ensuite un nouveau panorama couleur de 360° avec la caméra MastCam de gauche de 34 mm au Sol 137, qui dévoile le magnifique paysage martien qui l'entoure à la hauteur de « Grandma's House » (Figure 15). Le rover explore ensuite les environs de « Snake River » (Figure 15:b), et test pour la première fois son outil de dépoussiérage (DRT) au Sol 150 (7 janvier 2013) sur la cible de roche dénommée « Ekwir_1 », qui se trouve sur le pavé d'affleurement que l'on peut voir en bas à droite du bras robotique du rover sur la figure 15:b (et Planche 6). Lors d'un court déplacement effectué sur le Sol 152 le 9 janvier 2013, l'une des roues de l'astromobile a accidentellement percutée et cassé une petite roche qui a été baptisé par la suite « Tintina » (Figure 17), qui se trouvait dans la partie supérieure de l'alignement de cailloux de « Snacke River », et que l'on peut voir vers le centre de la figure 15:b prise deux semaines plus tôt. L'intérieur de la roche est de couleur blanchâtre et semble être constitué de minéraux hydraté qui ressemble beaucoup à du gypse, contrairement à la couche de surface qui est plus oxydé et de teinte plus foncée. Sur le Sol 154, le rover photographie une pierre qui est recouverte d'un ensemble de concrétion sphérique foncée dénommée « bumps » et de nodules creux aux teintes plus claires (Figure 18).

L'astromobile rejoint le site ou se trouve le pavée d'affleurement rocheux baptisée « John klein » sur le Sol 162 le 19 janvier 2013. L'affleurement rocheux « John klein » est également visible sur le panorama de la figure 15:b, il se trouve dans la partie supérieure au centre de

Planche 5 : Suite du panorama couleur pris entre les Sols 170 et 176.

l'image. Depuis son départ du site d'atterrissage, le rover à parcourus plus de 700 mètres à la surface de la planète Mars. Il s'agit du site qui a été sélectionné pour effectuer le premier forage de la mission, et qui a été nommé en hommage à l'ancien chef adjoint du projet décédé en 2011. Entre les Sols 170 et 176, du 27 janvier au 3 février 2013, Curiosity entame et fini le vaste panorama couleur de 360° de la région avec la MastCam (Planche 5), dévoilant ainsi la beauté du paysage martien se trouvant au abord ouest de « Yellowknife Bay » à la hauteur de « John klein », qui se trouve vers le centre de l'image. Le lendemain, grâce à des mouvements coordonnés de l'articulation du poignet et de la rotation de la tourelle du bras robotique du rover, l'imageur MAHLI a exécuté un nouvel autoportrait du robot (Figure 19), qui se tient près de l'endroit ou sera creusé le premier forage de Curiosity sur le sol martien. Il s'agit de la troisième dalle de pierre à partir du bas se trouvant à gauche de la figure 19. Le pavé d'affleurement présente une série de fractures qui ressemble à des fentes de dessiccation, avec des petites concrétions sphériques encastrer dans la roche et des petites veines blanchâtres qui serpentines à sa surface. Les premiers tests de la foreuse rotative vont débuter sur le Sol 176, avec le test du martèlement de la mèche à percutions de la foreuse sur une cible se trouvant sur l'affleurement « John Klein ».

Figure 18 : Bumps et nodules

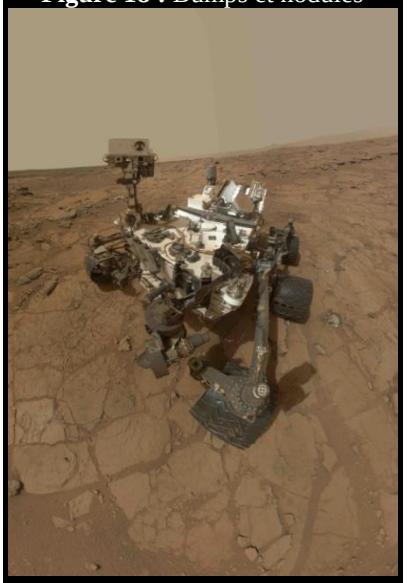


Figure 19 : Autoportrait au Sol 177 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Viens ensuite le test de la rotation de la mèche à percussion de la foreuse au Sol 180 le 7 février, en creusant un petit trou de 1,6 cm de diamètre sur environ 2 cm de profondeur, qui sera par la suite étudié par

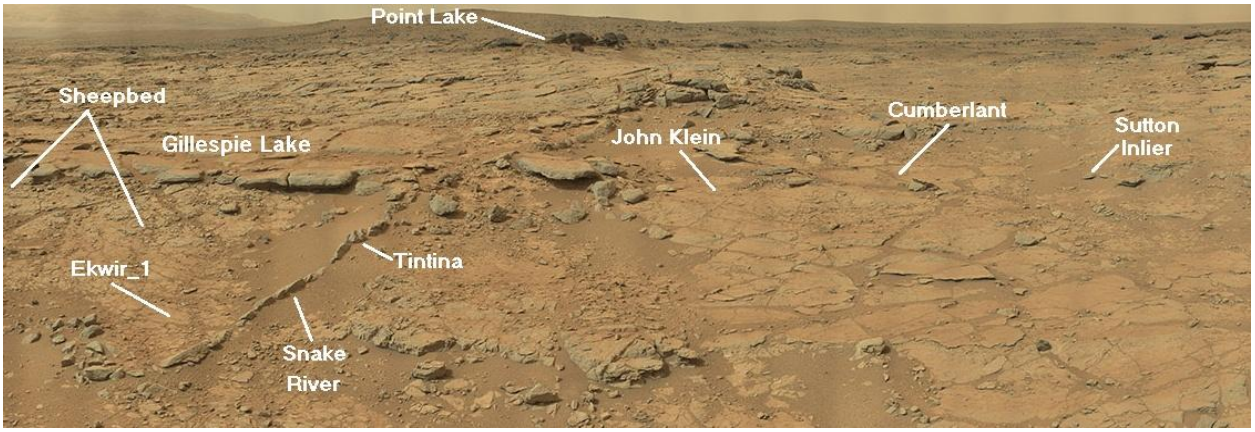


Planche 6 : Mosaïques de la zone de travail à Yellowknif Bay pris par la MastCam 34 mm entre les Sols 136, 137, 138 et 141 (Crédit : NASA/JPL/Caltech/MSSS)

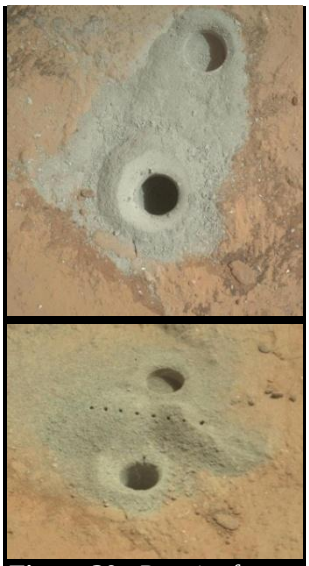


Figure 20 : Premier forage (Crédit : NASA/JPL/MSSS)

les différents instruments scientifiques du rover. Après avoir effectué les différentes étapes préparatoires, le forage avec collecte d'échantillon pour les minis laboratoires d'analyse chimique est exécuté sur le Sol 182 le 9 février (Figure 20), juste en bas du premier forage qui a servit de test. Le forage mesure 1,6 cm de diamètre sur 6,4 cm de profondeur. La roche qui a été pulvérisée par la foreuse présente une teinte grisâtre, ce qui semble vouloir indiquer que l'état d'oxydation de l'échantillon est moindre que la poussière rouge qui se trouve tout autour à la surface de Mars. La poudre de roche collectée par l'appareil devra subir un tamisage et plusieurs autres étapes de préparations avec l'outil de manipulation et de traitement des échantillons CHIMRA, avant d'être acheminés au mini laboratoire chimique SAM sur le Sol 193 et CheMin au Sol 195. Le lendemain, c'est le tour au laser de ChemCam de viser et de tirer à plusieurs reprises dans la région nord du trou, ou se trouve le plus grand amas de résidu du forage, en récupérant après chaque tir le spectre de lumière émises par le nuage de gaz provenant de la poudre de roche pulvérisée. Deux nouvelles portions finement tamisée de l'échantillon de « John klein » sont livrées à SAM aux Sols 196 et 198, une fois les échantillons déversés dans l'une de 74 coupelles du carrousel, le couvercle protecteur est abaissée et la coupelle est déplacée vers l'un des deux fours. Les résultats d'analyse du spectromètre de diffraction des rayons X de CheMin sur la poudre de roche que contenait l'échantillon, a dévoilé la présence à la hauteur de 20% de phyllosilicates (argile de type smectite). Le reste de l'échantillon était composé de feldspath, de plagioclase, de pyroxène, de magnétite et d'olivine. Et les résultats d'analyse de l'expérience des gaz dégagés (EGA) obtenue par le spectromètre de masse quadripolaire (QMS) de SAM exécutées aux Sols 196, 198, 224 et 227 (Figure 21, image de gauche), après avoir chauffée les échantillons à plus de 835 °C, montre la présence d'eau, de sulfure d'hydrogène (H_2S), de dioxyde de carbone (CO_2), d'oxygène, de dioxyde de soufre (SO_2) et de l'hydrogène. L'analyse complémentaire effectuée par le chromatographe en phase gazeuse (GC-MS) de SAM, a détecté la présence de chlorométhane (CH_3Cl) et de dichlorométhane (CH_2Cl_2). Ces longues chaînes de molécules pourraient être des fragments de molécule organique plus complexe comme les acides gras, mais de tels composés peuvent également se former en l'absence de vie, lorsque l'eau interagit avec les minéraux dans les sources hydrothermales. Le soufre et le calcium ont également été détectés lors d'analyses effectuées par le spectromètre

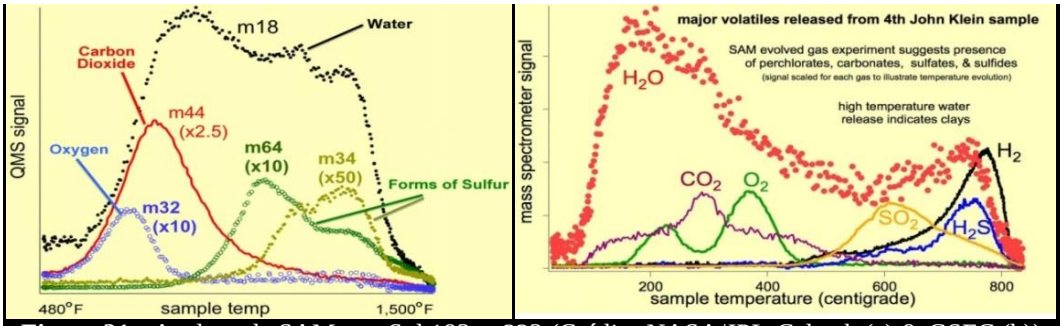


Figure 21 : Analyse de SAM aux Sol 193 et 223 (Crédit : NASA/JPL-Caltech (a) & GSFC (b))

APXS sur plusieurs échantillons de surface rocheuse se trouvant dans la partie ouest de la petite dépression de « Yellowknife Bay », qui ressemble à un ancien lit de lac.

Sur le Sol 200 le 27 février 2013, le rover Curiosity éprouve pour la première fois des problèmes avec sa mémoire flash sur son ordinateur principal (A), et active le mode de protection automatisé de mise en vieille minimale ou mode sans échec « safe mode », en réduisant au minimum ses activités à la surface de Mars en attende de nouvelles instructions en provenance de la terre, puis le robot se branche sur son système électronique auxiliaire (ordinateur B). Le même jour, mais situé à plus de 8 200 km de distance plus à l'ouest dans les plaines sombres de « Meridiani Planum », le rover Opportunity a également eût le même type de problème avec sa mémoire flash. Une hypothèse possible pour expliquer cette corrélation qui reste encore à confirmer, serait que des particules très énergétiques provenant de l'activité solaire auraient pu endommager la mémoire flash des ordinateurs des rovers. Des séquences d'images pris par le coronographe de la sonde Soho (Solar & Heliospheric Observatory) entre le 26 et le 28 février 2013, a démontré qu'il y avait bien à la même époque une forte activité d'éruptions solaires. Les mesures effectuées par le détecteur de particules énergétiques RAD embarqué abord du rover, ont également démontrées qu'il existait une forte corrélation entre la hausse du tau de radiation à la surface de la planète Mars et l'activité solaire. Sur le Sol 206 le 6 mars 2013, la mission de Curiosity était rendue à son sixième mois d'exploration de la surface de la planète, soit le huitième de sa durée de vie nominale. Tandis que de l'autre côté de la planète dans les plaines de « Meridiani Planum », le rover Opportunity avait déjà entamé sa dixième année d'exploration de la planète rouge.

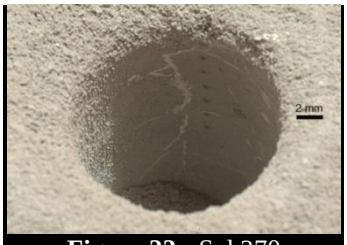


Figure 22 : Sol 270 (Crédit : NASA/JPL/MSSS)

Trois semaines plus tard sur le Sol 221 le 21 mars, et après avoir effectués les vérifications d'usage du bon fonctionnement des différents instruments scientifique et du système de navigation du rover, qui est branché sur le système auxiliaire (l'ordinateur B). L'astromobile Curiosity reprend finalement ses activités sur la planète Mars, et livre une troisième portion de l'échantillon au mini laboratoire SAM au Sol 224 (Figure 21, image de droite), suivit d'une quatrième portion au Sol 227. Le laser de ChemCam est de nouveau utilisé à plusieurs reprises au Sol 227 (Figure 22, l'image MAHLI a été prise au Sol 270), en visant avec précision dans la partie supérieure du mur intérieure du forage en faisant dix groupements de tirs de trente coups de laser chacun, et sur l'amas de résidu de poussière qui se trouve entre les deux forages avec cinq groupements de tirs de trente coups de laser chacun. Curiosity se prépare ensuite à passer à travers sa première conjonction solaire en mode autonome,

qui a eût lieu entre les Sols 239 et 256 du 9 au 26 avril. Durant cette longue période, le rover va exécuter une série de tache quotidienne qui on été programmé d'avance, dont l'étude environnementale impliquant entre autres les instruments RAD, DAN, REMS et SAM. L'analyse d'un échantillon d'atmosphère par le spectromètre QMS de SAM au Sol 231, collecté depuis une vanne d'admission qui permet au gaz extérieur à la paroi du rover d'être introduit dans l'instrument pour être achiminé aux spectromètres TLS et QMS, soit une semaine avant d'entrer en conjonction solaire, a démontré que l'Argon^{36} était quatre fois plus abondantes que l'Argon^{38}, avec un rapport d'abondance de 4,2 contre 5,5 pour le reste du système solaire. Ses mesures de haute précision lèvent le voile sur l'incertitude qui persistait toujours concernant l'origine des petits volumes d'argon extraites des météorites martiennes, et apporte la preuve que ses météorites découvertes sur terre viennent véritablement de Mars. Le ratio de ses deux isotopes stables et inerte de l'Argon (Ar^{36}/Ar^{38}), qui réagit très peu avec son environnement, est utilisé comme traceur pour nous donner une idée sur l'évolution atmosphérique et climatique des planètes. Sur Mars, se ratio est faussé par la perte d'une grande partie de son atmosphère originale qui a été perdue à l'époque ou Mars était beaucoup plus chaude et humide, et donc propice pour héberger des conditions favorable aux maintiens de la vie à sa surface. La forme la plus légère de l'argon a été davantage perdue, car elle demande moins d'énergie pour s'élever dans l'atmosphère et de s'échapper par la suite dans l'espace, ce qui à la longue a favorisé l'enrichissement relative de l'isotope lourd au dépend de l'isotope léger.

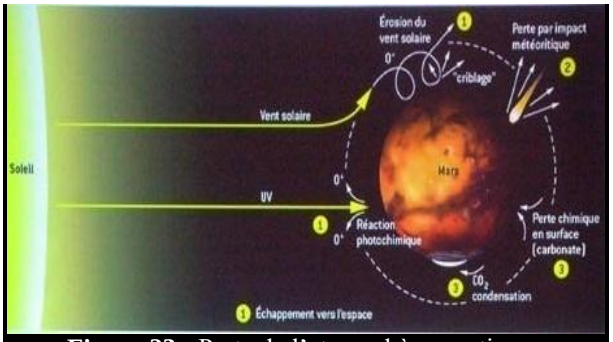


Figure 23 : Perte de l'atmosphère martienne

Deux scénarios sont encore concurrents de nos jours pour expliquer la perte de l'atmosphère originale de la planète Mars. En premier lieu, il y a la théorie sur l'arrêt de la dynamo martienne à la fin du Theiikien/Noachien vers 4,2 milliard d'années, causé essentiellement par le refroidissement rapide de la planète. Mars étant deux fois plus petite que la terre, elle a donc emmagasiné deux fois moins d'énergie thermique et d'éléments radioactifs de courte période (radioactivité éteintes) lors de sa phase d'accrétion, et cette énergie c'est dissipé très vite par le transport radiatif et convectif de la chaleur. En se refroidissant, le cœur de la planète n'avait plus assez d'énergie pour entretenir les mouvements de convection verticale des fluides conducteurs situé à l'interface liquide entre le noyau externe, qui entoure la gaine centrale solide et le manteau inférieur de la planète. N'ayant plus cet apport d'énergie supplémentaire, le manteau inférieur s'est tranquillement refroidit en se solidifiant, laissant derrière lui des poches de laves qui vont devenir par la suite des points chaud qui vont donner naissance au dôme de « Tharsis » et à « Elisium Mons » avec leur énorme coulé de lave et dépôts soufrés. La configuration globale causée par le mouvement d'entrainement d'ensemble couplé à la force de Coriolis engendré par la rotation de la planète, ne pouvait plus à elle seul entretenir un effet dynamo pour maintenir un champ magnétique globale capable de protéger l'atmosphère de la planète de l'érosion permanente du vent solaire. Mars aurait donc perdus son atmosphère qui a été soufflé par le vent solaire sur une longue période de temps géologique (Figure 23). La deuxième théorie fait référence à la dernière période de bombardement tardif pour expliquer la dichotomie martienne entre les plaines basse du nord et des hautes terre du sud, et qui impliqueraient la collision catastrophique de trois gros astéroïdes ou comètes qui auraient creusés les énormes basins d'impactes situé dans l'hémisphère nord de la planète (« Utopia Planitia »,

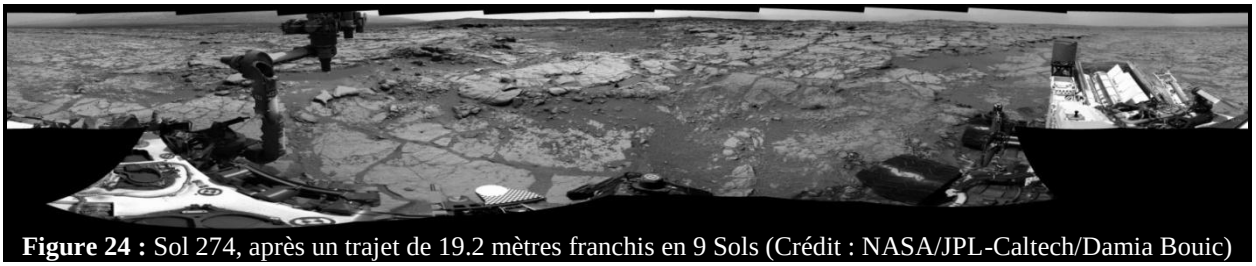


Figure 24 : Sol 274, après un trajet de 19.2 mètres franchis en 9 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

« Amazonis Planitia » et « Chryse Planitia »). L'énergie dégagée par ses impacts aurait soufflées une bonne partie de l'atmosphère martienne, tout en déstabilisant la structure interne de la planète avec recrudescence de l'activité volcanique de surface et perte du champ magnétique. Le fond du cratère est le point le plus profond se trouvant sur des centaines de kilomètres environnants, et il existe des preuves d'écoulements de surface vers un réseau de canaux partant du bord du cratère « Herschel » (600 km plus au sud) jusqu'a « Gale ». Plusieurs événements survenant à des époques différentes peuvent expliquer la présence d'inondation avec formation de lac dans le cratère.

Figure 25 : Le forage Cumberland Sol 279 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

À la sortie de la conjonction solaire sur le Sol 261, un nouveau logiciel de bord pour l'exploration de la surface martienne est téléchargé puis tester sur les Sols suivant. Après avoir passé plus de trois mois d'immobilité sur le site de « John Klein ». Le rover se déplace sur une courte distance pour se dirige vers le pavé d'affleurement « Cumberland » au Sol 272, qui se trouve à environ 2,75 mètres à l'ouest, et qui a été sélectionné pour être la deuxième cible de forage dans le but de valider les résultats obtenus sur « John klein ». Par rapport à la figure 19, le pavé d'affleurement « Cumberland » se trouve tout juste derrière la roue avant droite du rover (voir également la planche 6). Le panorama de la figure 24, composé d'une mosaïque de plusieurs images pris par les caméras de navigation (NavCam) de l'astromobile, nous montre la position de Curiosity au Sol 275 près du site ou sera exécuté le deuxième forage. Il s'agit de la deuxième dalle d'affleurement rocheux qui se trouve à droite du bras robotique située juste devant l'astromobile, elle est également visible en bas au centre de l'image de droite de la planche 5. Il s'agit d'un pavé d'affleurement de forme rectangulaire qui présente plusieurs fissures et de petites veines minérales blanchâtres qui parcourent sa surface. Le deuxième forage sera creusé vers le centre de la partie supérieure gauche du pavé. Les deux trous du premier forage effectué à « John Klein » sont également visibles sur l'image, il s'agit de la petite tache sombre que l'on peut voir vers le centre de la partie gauche du panorama, et qui est située sur la troisième dalle de pierre qui se trouve à gauche à la mi-hauteur du coude du bras robotique de l'astromobile.

Figure 26 : John Klein et Cumberland (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Le deuxième forage est finalement exécuté sur le Sol 279 le 19 mai 2013 (Figure 25 et 26), avec un trou de 1,6 cm diamètre et de 6,6 cm de profondeur. Le forage de « Cumberland » est donc un peu plus profond que celui creusé précédemment au Sol 182 sur le site de « John Klein ». La deuxième image de la figure 25 nous montre la poudre de roche qui a été collecté puis vidé dans la petite pelle (Scoop), via l'inversion du mouvement de rotation de

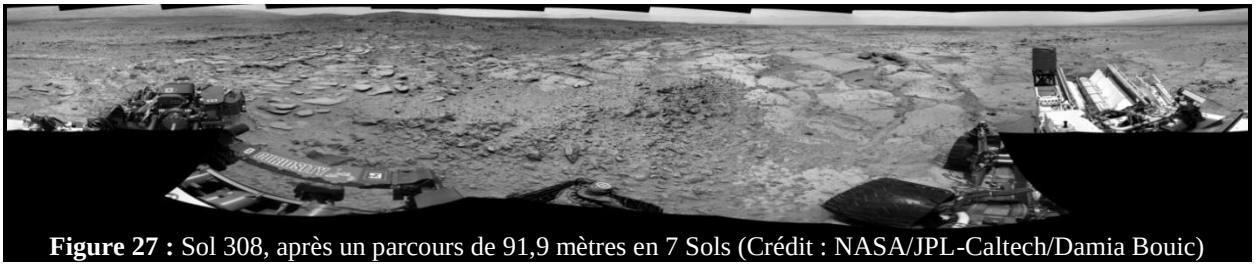


Figure 27 : Sol 308, après un parcours de 91,9 mètres en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

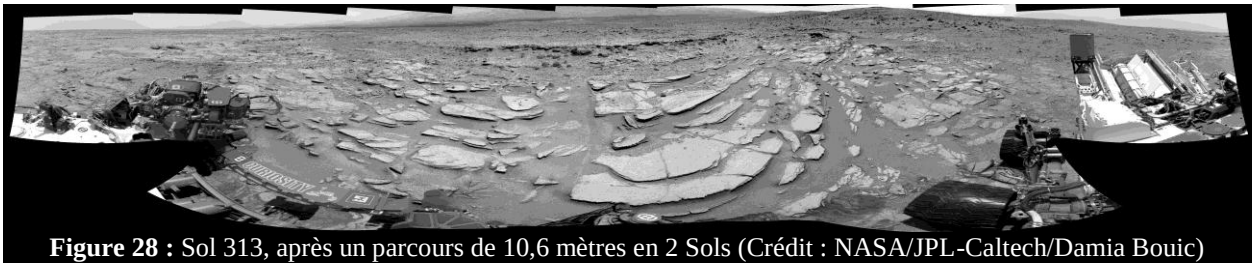


Figure 28 : Sol 313, après un parcours de 10,6 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

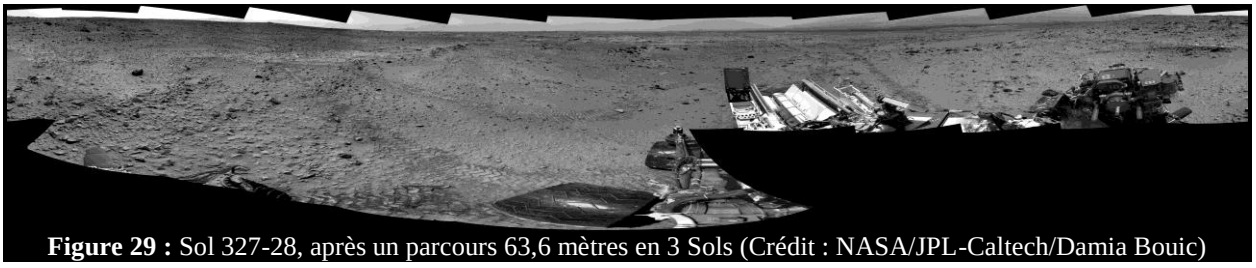


Figure 29 : Sol 327-28, après un parcours 63,6 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

la vis sans fin de la perceuse à percutions rotative après le forage. Différentes portions de l'échantillon seront par la suite acheminée aux mini laboratoires SAM (chimie organique) et CheMin (chimie minéralogique) après avoir subit différents traitement de tamisage par CHIMRA. Sur l'image de droite de la figure 26, on peut voir un alignement de trous dans l'amas de résidus de poudre de roche situé dans la partie nord-ouest du forage, et qui a été creusés par le laser de ChemCam au Sol 281. Après avoir recueillies et préparer trois échantillons (Sols 282, 286 et 290) dans le mudstone (sédiment fluviaux-lacustre à grain très fin composé d'argile et de boue) de « Sheepbed » à « Cumberland » pour des analyses future qui seront effectuées durant la mission, le rover Curiosity se remet en route au Sol 295 le 5 juin 2013. Les argiles présentent une surface spécifique élevée et des interfoliaires chargés négativement qui adsorbent et protègent les molécules sur des échelles de temps géologiques. Elles possèdent également des cations associés à l'eau dans les interfoliaires, ce qui ralentit l'écoulement de l'eau et favorise l'accumulation de composés organiques au fil du temps, lors de période alternant entre humide et sec (zone évaporite). L'astromobile tourne ensuite vers l'ouest pour se diriger vers le site de travail « Point Lake », que le robot va étudier par la suite durant quatre jours entre les Sols 302 et 306, dans le but d'identifier l'origine et le type de roche qui se trouve à cet endroit (basaltique ou sédimentaire).

Curiosity reprend de nouveau la route au Sol 307 à la vitesse moyenne de 0,15 km/h, puis le lendemain le rover tourne vers l'ouest et entreprend le cliché panoramique de la figure 27 avec ses caméras de navigation avant (Front HazCams). La partie droite de l'image correspond au champ de vision arrière du rover, tandis que la partie gauche correspond au champ de vision avant qui pointe dans la direction vers laquelle se dirige l'astromobile. Une deuxième vue

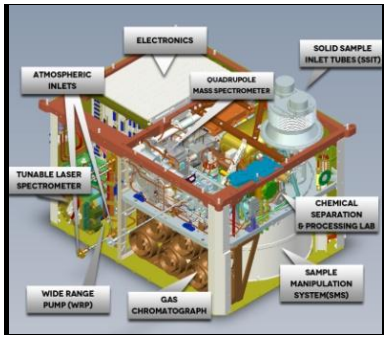
Figure 30 : Sol 333, après avoir franchit 79,9 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 31 : Sol 337, après un parcours de 104,07 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

panoramique est prise une semaine plus tard sur le Sol 313 (Figure 28), qui dévoile la différence de terrain traversé sur une courte distance d'environ dix mètres. L'astromobile se déplace de nouveau vers l'ouest et croise pour une deuxième fois sur sa route le site d'affleurement rocheux « Shaler » au Sol 317, qu'il étudiera par la suite durant les cinq jours suivants jusqu'au Sol 323. Le grand départ de la région de « Glenelg » pour se diriger vers la base du mont « Sharp », qui se trouve huit kilomètre plus loin vers le sud-ouest, s'effectue sur le Sol 324 le 4 juillet 2013. Curiosity amorce alors un long voyage qui va durée plus d'un an, et qui le conduira par la suite dans l'ascension du mont « Sharp » à travers des dunes et des vallées sinueuses aux parois montagneuses, ou les paysages seront d'une extrême beauté et à couper le souffle. Avant de tourner vers le sud-ouest au Sol 327, le rover prend un nouveau cliché panoramique des lieux ou l'on peut reconnaître le site de « Rockness » (Figure 29), qui se trouve dans la partie supérieure au centre de l'image. Curiosity prend un nouveau cliché panoramique avec ses caméras de navigations avant au Sol 333 (Figure 30), ou l'on peut encore voir la région de « Yellowknife Bay » dans la partie supérieure droite de l'image qui s'éloigne peut à peut. Deux jours plus tard le 16 juillet 2013 au Sol 335, l'astromobile franchis son premier kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. L'instrument SAM aura réalisé un total de 15 analyses GC-MS sur les résidus de poudres de roches récolté à « Cumberland » (incluant un blanc et des analyses d'échantillons successives), et exécutée sur une large période de temps situé entre les Sols 277 et 1593[2] (du 17 mai 2013 au 29 janvier 2017), afin d'optimiser la couverture des données. L'expérience EGA consiste à faire chauffer des échantillons de roche ou de sol martien broyés jusqu'à environ 800–900 °C dans un petit four. Pendant la montée en température, les minéraux se décomposent et libèrent des gaz (gaz « évolués »). Ces gaz sont ensuite analysés pour identifier la composition chimique (organique) et minéralogique de l'échantillon. SAM peut analyser les molécules libérées lors de la pyrolyse selon trois modes : EGA, EGA couplée à la GC-MS et analyse par voie humide avec EGA et GC-MS. Lors de l'EGA, les composés volatils dégagés lors de la pyrolyse des échantillons solides sont directement envoyés au spectromètre de masse (MS) pour détection.

[2] First Detections of Dichlorobenzene Isomers and Trichloromethylpropane from Organic Matter Indigenous to Mars Mudstone in Gale Crater, Mars: Results from the Sample Analysis at Mars Instrument Onboard the Curiosity Rover, January 31, 2020

Le Fonctionnement de SAM



Les spectromètres de SAM peuvent fonctionner seuls ou en combinaison avec un ou les deux autres instruments. Les échantillons peuvent provenir de l'atmosphère de Mars ou de résidus solide provenant d'une collecte de sol ou de roche lors d'une campagne de forage. Les analyses des gaz émis (EGA) ou expériences d'analyse des gaz évolués par spectrométrie de masse quadripolaire (QMS) sur des échantillons solides tamisé et pulvérisé, est l'expérience principale de SAM avec 59 des 74 coupelles qui y sont dédiées (9 coupelles sont dédiées aux expériences de chimie humide et 6 pour l'étalonage). Les séquences de mesure dure environ entre 4 et 6 heures selon les conditions environnementales, et utilise la majeure partie de l'autonomie de la batterie de Curiosity. Les échantillons solides collectés par le rover doivent subire un traitement de décomposition thermique (pyrolyse) et chimique avant de collectés et d'analyser les gaz émis. Après le chauffage d'un échantillon solide selon différents palliés de température, le gaz émis peut être acheminé vers le chromatographe en phase gazeuse (GC) doté de six colonnes chromatographiques complémentaires de 30 mètres de long chacune. Cet instrument a pour fonction de trier les différentes molécules de l'échantillon selon leur masse et d'en déterminer la quantité. Pour ce faire, il utilise un flux de gaz inerte composé d'hélium (qui ne réagit pas avec les molécules de l'échantillon) qui pousse l'échantillon dans un tube long et étroit enroulé en spirale. L'intérieur du tube est recouvert d'un film mince qui va ralentir les molécules durant leurs parcours à travers le tube selon leur masse. Les molécules les plus légères sortiront du tube en premier, suivies des molécules de plus en plus lourdes.

Comme les molécules de poids différents sortent du tube à des moments différents, le chromatographe en phase gazeuse (GC) peut envoyer des groupes de molécule de masse différents vers le spectromètre de masse quadripolaire (QMS) de SAM, qui déterminera précisément le type de molécule composant chacun des groupes. Pour aider à identifier les molécules, le spectromètre (QMS) envoie des électrons à grande vitesse qui fragmente et ionise les molécules en leur conférant une petite charge électrique. Le spectromètre (QMS) utilise des champs de courant continu et alternatif pour trier les molécules et les fragments chargés électriquement en fonction de leur masse. Les molécules et les fragments de masses différentes sont ensuite comptés par un détecteur à différents moments, afin de générer un spectre qui identifit de manière unique les molécules présentes dans les gaz. Les analyses du spectromètre (QMS) couplées aux analyses du chromatographe en phase gazeuse (GC) forme le GC-MS.

Une fois les molécules identifiées par le spectromètre de masse quadripolaire (QMS), l'échantillon est dirigé vers un spectromètre laser accordable (TLS) qui permet d'identifier et d'analyser certaines molécules volatiles, comme le méthane, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau. Le spectromètre (TLS) peut être réglé pour émettre une gamme de couleurs (accordable), il utilise l'absorption de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques pour mesurer les concentrations et les rapports isotopiques des produits chimiques. Pour ce faire, l'échantillon pénètre dans une chambre munie de miroirs positionnés avec précision à chaque extrémité. Un faisceau laser est émis à travers un minuscule trou dans l'un des miroirs. La lumière du laser qui rebondit entre les miroirs illumine l'échantillon qui absorbent alors une certaines couleurs (fréquences) de lumière, le spectromètre (TLS) identifie ensuite les couleurs du faisceau laser qui ont été bloquées pour identifier les molécules. Comme pour les molécules volatiles se trouvant dans l'atmosphère ainsi que dans le sol et les roches, les échantillons de l'air martien peuvent être envoyés directement au spectromètre (QMS/TLS) sans passer par les autres. Après usage, les coupelles peuvent être nettoyées par pyrolyse avant d'être préparées à nouveau pour accueillir un nouvel échantillon, mais chaque récipient de chimie par voie humide est à usage unique.

VERS LE MONT SHARP
(Sol 339 à 573)

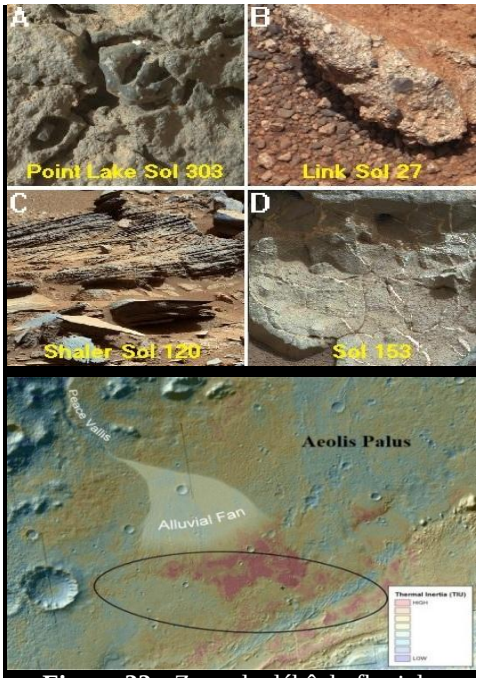


Figure 32 : Zone de débâcle fluviale (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/GL)

Le rover Curiosity a trouvé des indices physiques et minéralogiques sur l'existence d'un ancien environnement habitable entre le site d'atterrissage « Bradbury Landing » et « YellowKnife Bay ». Des indices qui indiquent très clairement que l'action de l'écoulement de l'eau a joué jadis un rôle très important dans la formation des différents types de terrain rencontrés jusqu'ici. Comme par exemple de l'observation de la forme arrondis des galets (Figure 32:B), ou du type de dépôts contenue dans les vaines minérales de teinte claire (Figure 32:D). Ou encore de la structure de certaines roches composées de fine lamelle sédimentaire inclinée, qui semble témoigner de l'action des vagues sur un rivage d'un lac peut profond (Figure 32:C). Et pour finir nous retrouvons des roches sous forme de conglomérat, dont certains présentent des encastrassions de concrétion minérale sphérique et de nodule qui se détaches avec l'érosion pour se répandre sur le sol tout autour (Figure 32:A et Figure 18). La détection de minéraux argileux dans les résidus de poudre de roche des forages exécuté à « YellowKnife Bay », démontre que du matériau basaltique à belle et bien été altéré chimiquement par de l'eau neutre à faiblement alcaline. Les résultats semblent indiquer que le fond du cratère « Gale » a été inondé à plusieurs reprises dans le passé, dont les dernières traces fluviales plus tardive sont le fleuve « Peace Vallis » et le delta en forme de cône de déjection dont l'une des extrémités est occupé par « Glenelg » (Figure 32). Cette inondation plus tardive semble résulter de la fonte du pergélisol se trouvant dans la région « Aeolis Mensae » (Planche 1) situé au nord-est du cratère « Gale ». La cause de ses débâcles inondables peut être multiple : chute d'astéroïdes ou de comètes, activité volcanique et hydrothermale du plateau « Elysium », ou encore d'un réchauffement atmosphérique relier aux différents paramètres orbitale de la planète Mars dans le temps. L'eau aurait par la suite coulée et percutée les remparts du flanc de la crête nord et ouest du cratère « Gale », une partie aurait ensuite emprunté les vallées conduisant à « Peace Vallis » avant de franchir les remparts intérieur du cratère et de finir sa course en forme de delta à la hauteur de « Glenelg ».

L'eau chargée en sulfate et en sel minéraux, s'est écoulé à travers des petits lits de rivières et de ruisseaux de 3 à 90 cm de profondeur et coulant à une vitesse située entre 0,2 et 0,75 m/s[3],

[3] Martian Fluvial Conglomerates at Gale Crater, Science Volume 340, 31 May 2013

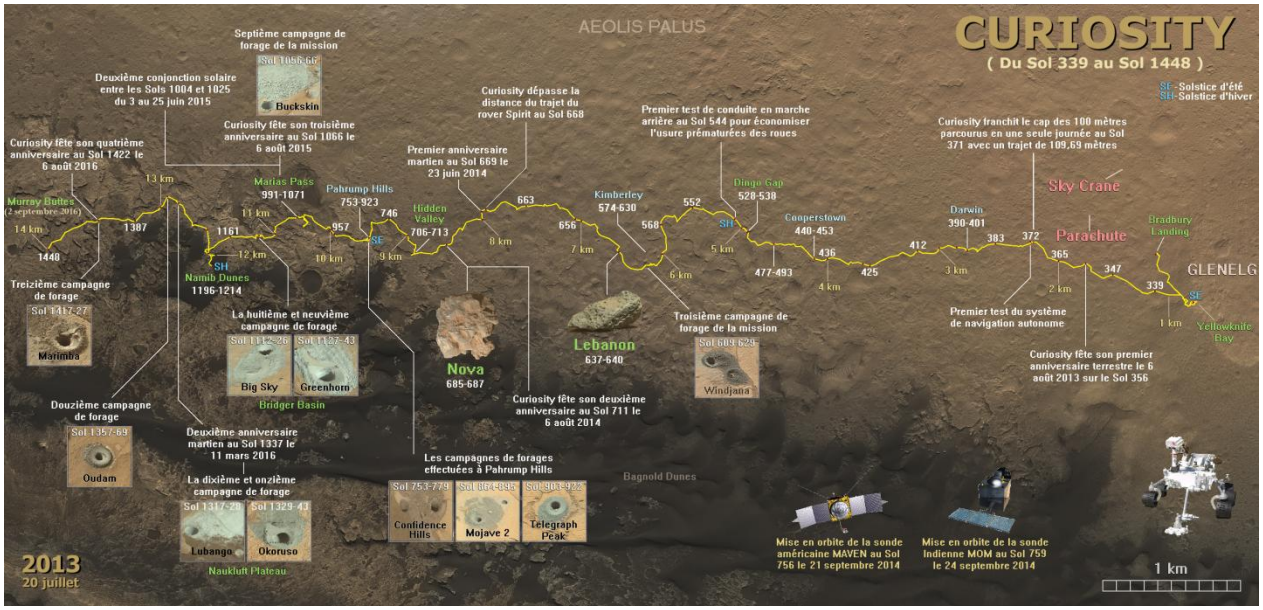


Planche 7 : Le trajet de Curiosity entre les Sols 339 et 1448 (soit durant 3 ans 1 mois et 2 semaines effectué entre le 20 juillet 2013 et le 2 septembre 2016), obtenu grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) en août et septembre 2012. Position et trajet du rover guidée par les cartes de la Nasa et de Phil Stooke. (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

drainant avec elle du sable et du gravier et créant par endroit des petits lacs. Avec le temps, l'eau est partie en laissant derrière elle des dépôts de sels qui ce sont accumulé dans des fissures, donnant naissance aux vaines de teinte blanche observé par Curiosity. Le gravier de forme arrondie va fini par formé des strates de conglomérats sédimentaires, et le sables drainé par le courant va à la longue former des dépôts en fine lamelle inclinées en se déposant au grès du courant. On peut également observer sur les images de Curiosity, de plus gros cailloux fracturée sur le sol qui semble résulter de l'éclatement de roches plus grosses par le gel (cryoclastie). Ces événements semblent avoir été préservés des inondations plus acides qui ont résulté de l'activité du dôme de « Tharsis » et de « Valles Marinéris », dont l'eau s'est écoulée à travers « Terra Cimmeria » avant d'être ralentie par les parois de la crête sud du cratère « Gale ».

Le rover entame la seconde phase de sa mission sur Mars et accélère quelque peu sa vitesse sur le terrain au Sol 340 le 21 juillet 2013, en conduisant vers l'ouest en direction d'un passage qui se trouve huit kilomètres plus loin à la base du mont « Sharp ». Ce trajet permet à l'astromobile d'éviter tous risques d'enlisement lors du contournant des cordons de dune de sable sombre qui se trouve devant lui. Durant l'itinéraire, cinq étapes (« Waypoints ») ont été présélectionnées le long du trajet pour permettre au rover de faire des études et des analyses de

Figure 33 : Sol 347, après avoir effectué un parcours de plus de 385 mètres exécuté en 6 séances de conduite quotidienne sur la planète Mars depuis le Sol 339 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Ed Truthan)

Figure 34 : Sol 349, après un parcours de 68,87 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Ed Truthan)

Figure 35 : Sol 354, après un parcours de 138,04 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

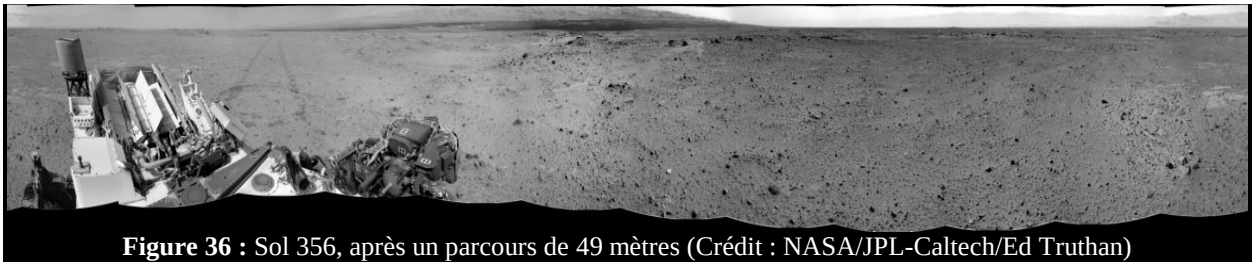


Figure 36 : Sol 356, après un parcours de 49 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Ed Truthan)

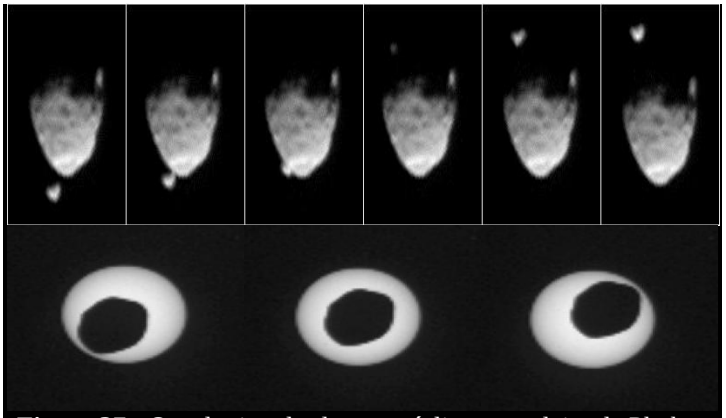


Figure 37 : Occultation des lunes et éclipse annulaire de Phobos (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Texas A&M University)

terrains durant le parcours. Le rover contourne ensuite par le Nord la série de petites collines dénommée « Twin Caims Island » d'une soixantaine de mètres de longueur entre les Sols 342 et 345, puis le robot passe au Sud de « Elsie Mountain » entre les Sols 345 et 349 (Figure 33 et 34). Deux jours plus tard, c'est l'arrivé de l'équinoxe d'automne sur la planète rouge au Sol 351 le 1er août 2013. Curiosity profite de se temps d'arrêt pour observer pour la première fois avec le téléobjectif de 100 mm de la MastCam de droite, l'occultation de la petite lune « Deimos » (15 km de diamètre) par la plus grande lune « Phobos » (27 x 22 x 18 km) qui évolue sur une orbite plus base (Figure 37). L'astromobile fête son premier anniversaire terrestre à la surface de la planète Mars cinq jours plus tard au Sol 356 le 6 août 2013 (Figure 36). Depuis son arrivé sur Mars, l'astromobile à fournis plus de 190 gigabits de données, dont plus de 71 700 images, effectué deux séances d'analyse complète avec ses minis laboratoires SAM et CheMin (« John Klein » et « Cumberland »), et le laser de ChemCam a procédé à plus de 75 000 tirs sur plus de 2 000 cibles.

Le 16 août au Sol 365, le robot franchi le cap de son deuxième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars. Quatre jours plus tard en début de matinée sur le Sol 369 le 20 août

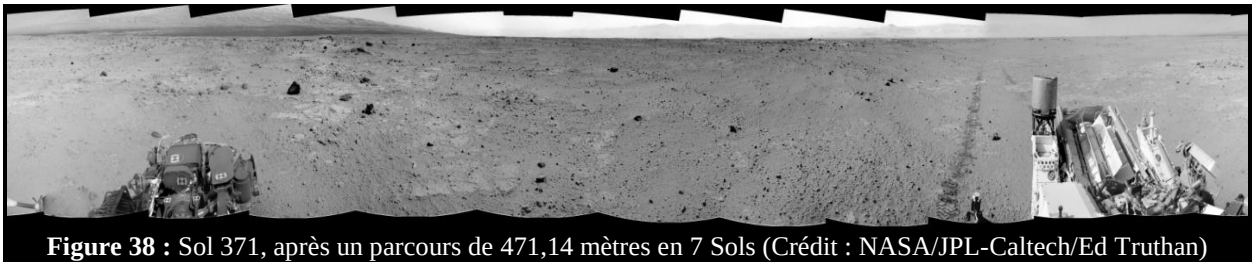


Figure 38 : Sol 371, après un parcours de 471,14 mètres en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Ed Truthan)

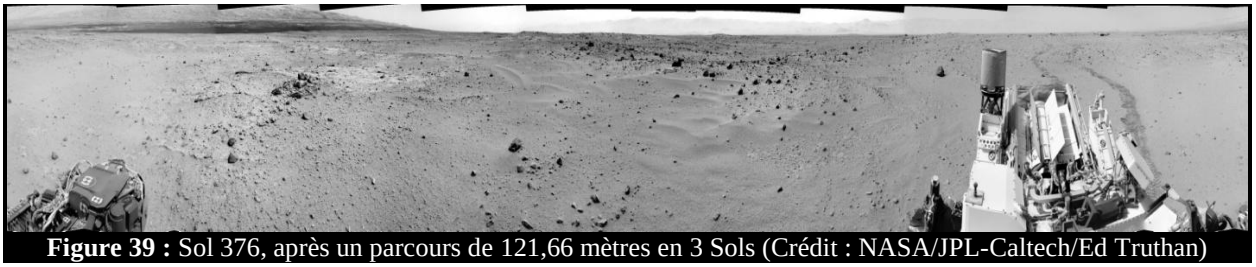


Figure 39 : Sol 376, après un parcours de 121,66 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Ed Truthan)

Figure 40 : Sol 378, après un parcours de 146,59 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Ed Truthan)

Figure 41 : Sol 385, après un parcours de 193,51 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Ed Truthan)

(Figure 37), le rover réussi à faire un petit montage vidéo de l'éclipse annulaire de la lune « Phobos », en prenant une séquence de trois images espacées de trois secondes d'intervalle chacune avec le téléobjectif de 100 mm de la caméra de la MastCam de droite. Deux jours plus tard, l'astromobile arrive près du petit cratère d'impact dénommé « Prospect Mesa » au Sol 371 (Figure 38). Et lors de la dernière séance de conduite sur le sol martien, Curiosity a exécuté sa toute première séance de roulement quotidien avec une distance parcourus supérieur aux cents mètres, en ajoutant 109,69 mètres de plus au compteur sur le Sol 371. Le système de navigation autonome (AutoNav) du robot est testé pour la première fois sur les Sols 372 et 374, en parcourant seul une courte distance d'un mètre sur chaque Sol. La navigation autonome est testée de nouveau au Sol 376 le 27 août sur un terrain plus accidenté, et sur une distance plus grande d'environ 13 mètres à la hauteur de « Discovery Ridge », que l'on peut voir devant le rover vers le centre de la partie gauche de la figure 39. Le pilotage automatique de Curiosity est basé sur les mêmes logiciels informatique des rovers Spirit et Opportunity, mais qui ont été adapté pour un pilotage plus sophistiqué déployé sur un plus gros astromobile. Les différents programmes de l'intelligence artificielle du système de navigation autonome du rover, analyse de manière

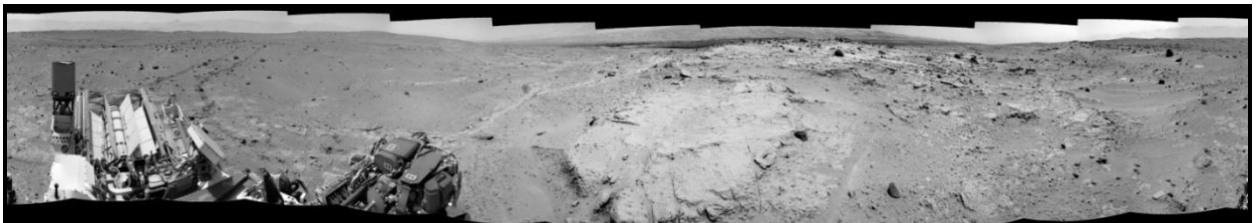


Figure 42 : Darwin au Sol 392, après un parcours de 100,37 en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Ed Truthan)

régulière chaque petit déplacement sur le sol martien en effectuant différents traitement numérique des images prisent par les pairs de caméra d'évitement d'obstacle HazCam et NavCam et par les caméras de navigation NavCam, afin de produire des images de synthèse numérique sur la géologie et la morphologie du terrain en trois dimension. A partir d'une commande initial fournis par les pilotes de Curiosity resté sur Terre, l'informant du point de départ et d'arrivé. Le rover était parfaitement capable de planifier seul son itinéraire de conduite sur Mars, et de contourner au besoin les différents obstacles qui se trouveraient devant lui lors de ses déplacements sur le sol martien. L'astromobile était également programmé pour s'arrêter automatiquement à la moindre hésitation, ou lors de la rencontre d'une situation imprévue sur le terrain qui pourrait mettre le robot en danger. Différents contrôles et protocoles de sécurité ont été prévus pour protéger Curiosity des erreurs de conduites lors de ses déplacements à la surface de la planète Mars. Dans de tel condition, l'astromobile avait la consigne de s'immobiliser et d'attendes de nouvelles instructions provenant de la terre. Avec le temps, la vitesse maximum du rover qui est de 270 m/h pourra être atteinte en toute sécurité, permettant ainsi à l'astromobile de franchir des distances qui seront de plus en plus grandes à la surface de la planète Mars.

Figure 43 : Sol 382 (caméra RMI) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Lanl)

Le laser de ChemCam est utilisé au Sol 382 pour creuser un ensemble de neuf trous distribué sur trois lignes dans une forme rectangulaire se trouvant sur une cible de terrain (Figure 43). Le rebot Curiosity bat le record absolu de la mission sur la distance parcourus sur un même Sol le 5 septembre 2013 (Sol 385), lors de la deuxième séance de conduite quotidienne supérieur aux cents mètres en ajoutant 137,36 mètres de plus au compteur. Cette dernière séance de roulement inclue les derniers 41 mètres qui ont été franchis en mode de navigation AutoNav (Figure 41), et qui a conduit le rover jusqu'au sommet de la petite colline « Panorama Point ». L'astromobile parcours 75,17 mètres supplémentaires au Sol 390, avant de s'arrêter de nouveau pour plusieurs jours jusqu'au Sol 401 devant l'affleurement rocheux baptisé « Darwin » (Figure 42). L'affleurement se trouve juste devant une petite dépression peu profonde de teinte claire d'une centaine de mètres de diamètre, que nous pouvons voir dans la partie supérieure gauche de la figure 41. Il s'agit de l'emplacement géologique ou se trouve le premier des cinq points de contrôle de terrain « Waypoints » situé le long du trajet planifié de Curiosity vers la base du mont « Sharp ». Le mont « Sharp » constitue le principal objectif de la mission depuis le départ du rover du site de « Glenelg » deux mois plus tôt. Après avoir étudié la composition et la texture des conglomérats rocheux et des veines, ou filons plus résistants à l'érosion qui jaillit du sol. L'astromobile reprend la route et quitte définitivement le site de « Darwin » au Sol 402 le 23 septembre 2013, pour se diriger vers le deuxième point d'intérêt géologique « Waypoint 2 »

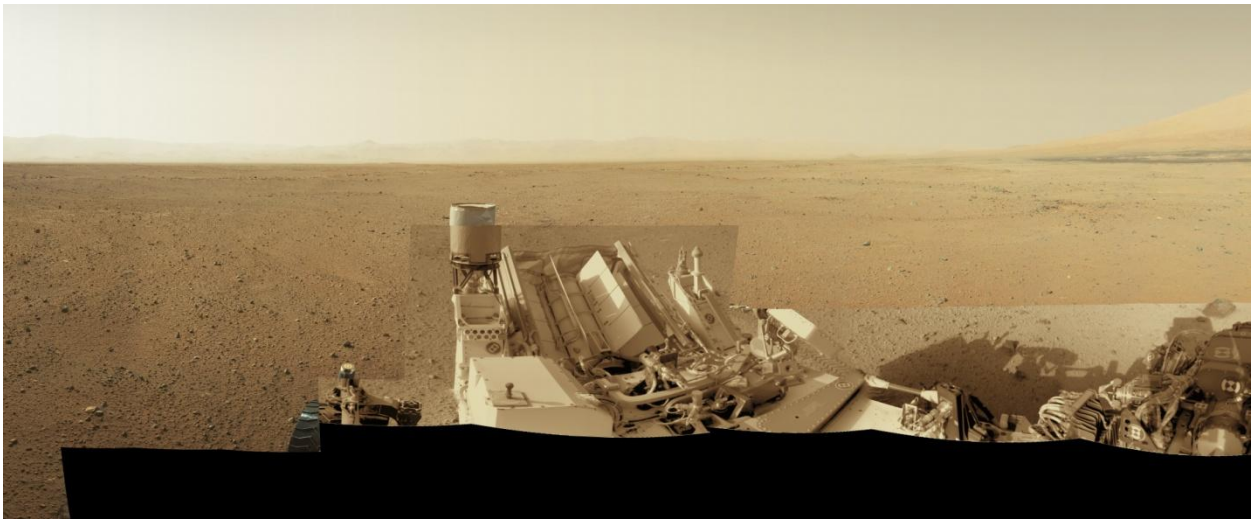


Planche 8 : Panorama couleur pris au Sol 421 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jame Sorenson)

(« Cooperstown »), qui se trouve à 1,1 kilomètre plus loin vers le sud-ouest. Curiosity franchis ensuite le cap de son troisième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars le 27 septembre 2013 (Sol 406). Deux semaines plus tard sur le Sol 421, le rover entame à l'aide de la caméra de gauche de 34 mm de la MastCam le magnifique panorama couleur de 360° de la planche 8.

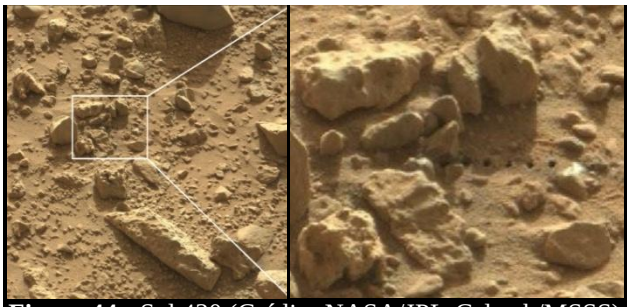


Figure 44 : Sol 430 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Le laser de ChemCam est de nouveau utilisé au Sol 430 pour creuser un alignement de six petits trous sur une cible de terrain (Figure 44), dans le but d'étudier la composition de la diversité des grains de sol qui se trouvent à cet endroit. Neuf jours plus tard au Sol 439, le robot arrive à proximité de son deuxième site d'intérêt géologique « Waypoint 2 », et s'arrête pour une durée de deux semaines (Sols 439-453) devant un petit escarpement d'environ 50 mètres de long et de 0,2 mètre de haut composé d'affleurement de matériau stratifié baptisé « Cooperstown » (Figure 45). Entre les Sols 417 et 440, le rover a parcourus une distance totale de 728,86 mètres en 12 séances de roulement, soit une distance moyenne parcouru quotidiennement de 60,7 mètres, incluant un long parcours de 121,62 mètres effectué au Sols 419. Il s'agit de la troisième séance de conduite quotidienne ayant une distance parcourus supérieur aux cents mètres effectué sur un même Sol. Durant le trajet Curiosity a également franchis le cap de son quatrième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars au Sol 436 le 28 octobre 2013.

L'astromobile profite de ce long temps d'arrête à « Cooperstown » pour télécharger et installer une nouvelle version de ses logiciels de bord entre les Sols 444 et 450, il s'agit de la troisième mise à jour depuis le début de la mission de Curiosity sur Mars et aucune observation scientifique a été programmée durant cet intervalle, le temps que le logiciel de vol du rover soit mis à jour. Les modifications apportées aux logiciels de bord ont pour objectifs d'améliorer l'opérabilité du bras robotique et la gestion de l'énergie pour les campagnes d'entrainement multi-Sol du rover. Il s'agit entre autre de mieux gérer l'alimentation électrique pour économiser l'énergie durant les longues nuits froides à l'approche de l'hiver martien dans l'hémisphère sud

Planche 8 : Suite du panorama du Sol 421 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jame Sorenson)

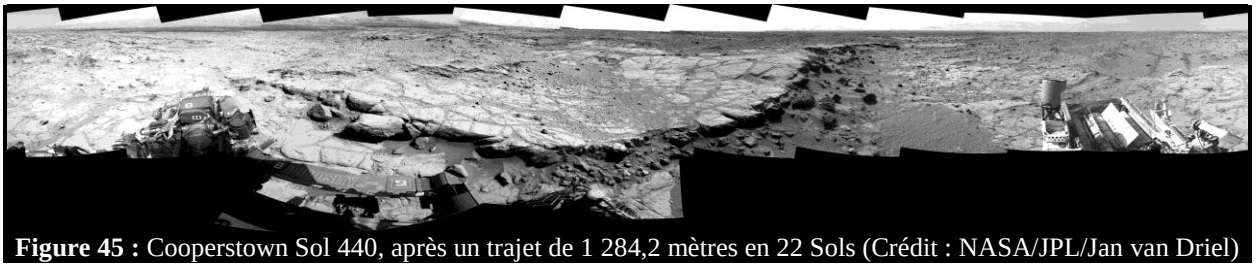


Figure 45 : Cooperstown Sol 440, après un trajet de 1 284,2 mètres en 22 Sols (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

de la planète, et de permettre au rover de stocker et de conserver des informations dans la mémoire non-volatile de l'astromobile durant le mode de veille, afin de permettre la conduite du robot en mode autonome sur plusieurs Sols. Mais trois jours plus tard sur le Sol 447 (8 novembre), au beau milieu de la remise à neuf des logiciels de bord et au cours d'une session de communication dirigé vers l'orbiteur MRO qui passait au-dessus du robot. L'orbiteur MRO sert de relais de communication quand la terre n'est pas accessible pour établir une liaison de transfère directe, qui doit alors s'effectuée un peu plus tard au court de la journée. Le rover est soudain rentré dans le mode de protection sans échec, après avoir lancé pour la première fois une réinitialisation inattendue à chaud de son ordinateur de bord, soit seulement quatre heures et demi après avoir chargé temporairement en mémoire les nouveaux logiciels de bord. Le réamorçage à chaud du système informatique a été provoqué par un conflit entre l'ancienne et la nouvelle version du programme embarquées qui gère le catalogue d'événement du système informatique (mutex). La mise à jour du système informatique ayant échouées, les logiciels de la nouvelle version seront de nouveau télécharger un peu plus tard au cours de la mission. Heureusement le tout est revenue à la normal trois jours plus tard sur le Sol 450.

Le cent millième tir du laser ChemCam a été effectué sur le Sol 450 le 11 novembre 2013, durant une séance de tirs composée d'un regroupement de dix trous de trente coup de laser chacun sur des cibles se trouvant à 4 mètres de distance sur la roche sédimentaire baptisée « Ithaque ». Le spectromètre LIBS de ChemCam est particulièrement sensible à la détection de l'hydrogène et de l'état d'altération et d'hydratation des matériaux ciblés par le laser, afin de détecter la composition minéralogique et chimique des roches analysées. Chaque tir de laser sur une même cible creuse plus profondément, et l'analyse de chaque groupement de tirs permet de

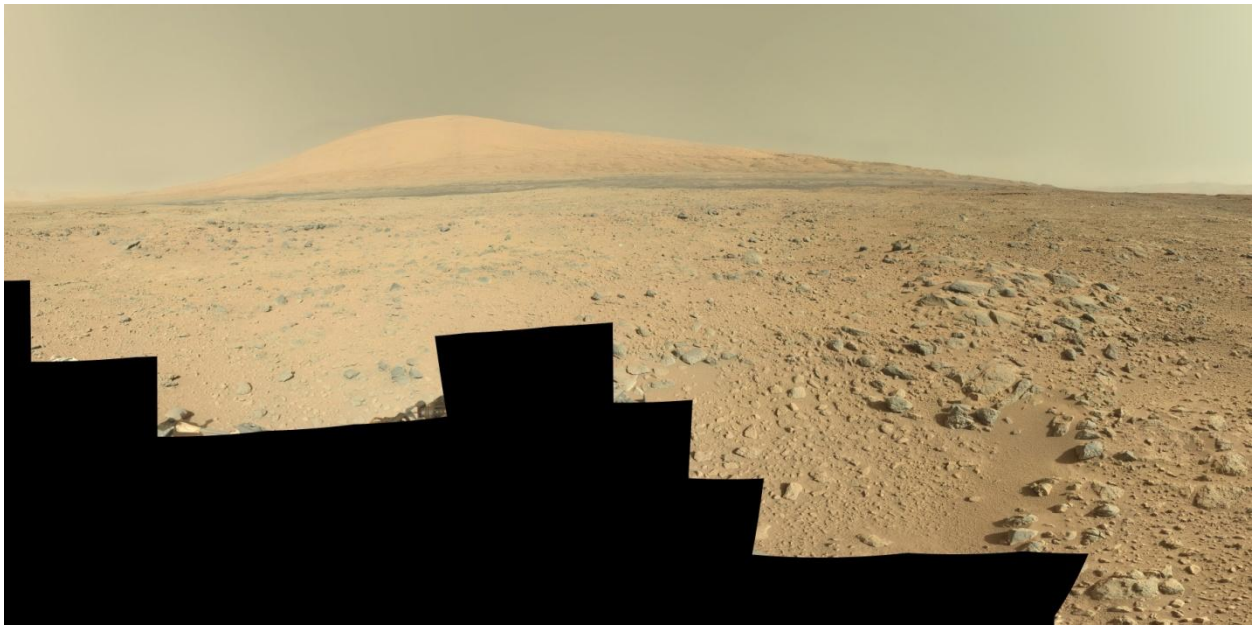


Planche 9 : Panorama couleur pris au Sol 467-68 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

Figure 46 : Sol 474, après un trajet de 529,99 mètres exécuté en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL/Ed Truthan)

Figure 47 : Sol 477, après un petit trajet de 5,42 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

faire ressortir le profile spectrale de la composition chimique selon la profondeur, soit de quelques millimètres pour des cible de sol à quelques dizaines de micromètres pour des cibles de roches. L'astromobile reprend ensuite la route au Sol 453 pour se diriger vers un autre site d'intérêt géologique qui se trouve à environ 300 mètres plus loin vers l'ouest. Après avoir effectué quelques mises aux points entre les Sols 458 et 465, afin de mieux comprendre la cause de la variation de tension électrique du bus de puissance causé par un court-circuit dans le générateur thermoélectrique radio isotopique (RTG), qui s'est révélé être sans danger pour la suite de la mission du rover sur la planète Mars. L'astromobile entame le magnifique panorama couleur de la planche 9 à l'aide de la caméra de gauche de la MastCam entre les Sols 467 et 468, puis le robot reprend la route au Sol 470. Une semaine plus tard sur le Sol 477 (Figure 47), l'astromobile fait une longue pose de dix jours le temps de faire quelques vérifications et de réinstaller la version 11 des nouveaux logiciels de bord entre les Sols 479 à 484.

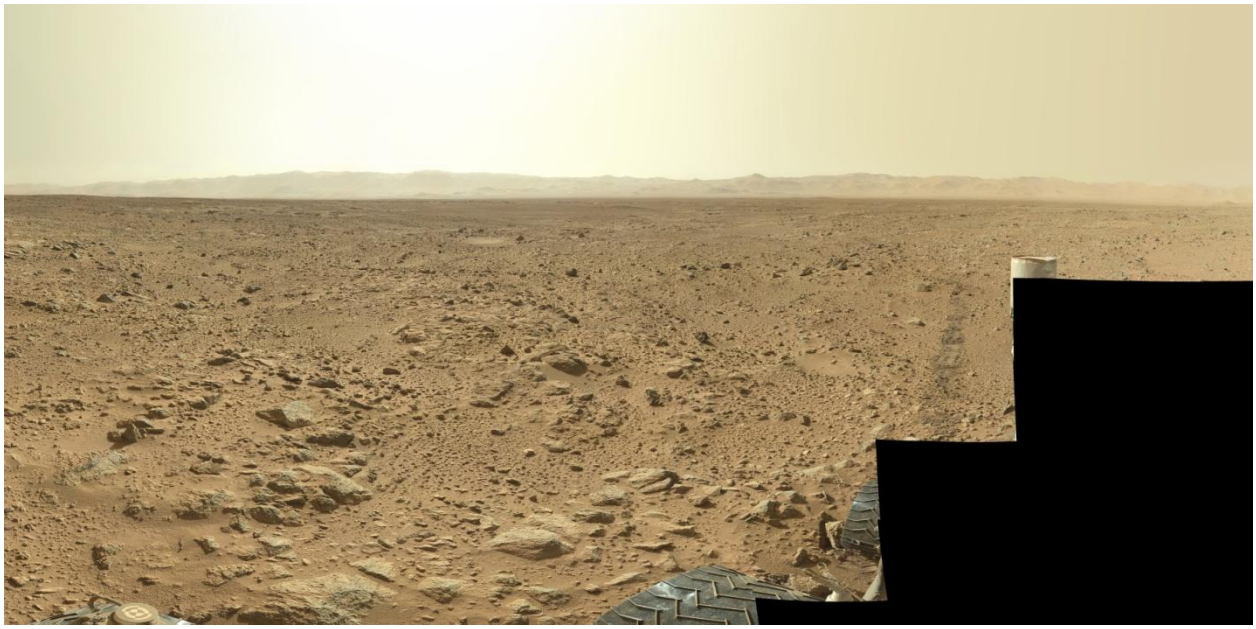


Planche 9 : Suite du panorama pris au Sol 467-68.

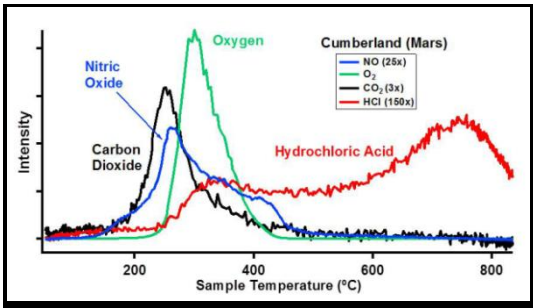


Figure 48 : Résultat de SAM pour le deuxième échantillon de Cumberland analysé au Sol 286 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le lundi 10 décembre 2013 au Sol 478 de la mission de Curiosity sur Mars, la revue américaine Science[4] publies enfin les premiers résultats d'analyses des échantillons de poudre de roche récoltée lors du forage exécuté à « Cumberland » au Sol 279, et qui sera suivit d'une autre publication en janvier 2014[5]. Quatre portions de l'échantillon recueillis sur le site de forage de « John Klein » (Sol 180), ont été préparées pour être analysés par l'instrument SAM aux Sols 196, 198, 224 et 227. Et six portions de l'échantillons recueillis sur le site de forage effectué à « Cumberland » (Sol 279), ont été préparées et mis en cache dans le système d'échantillonnage pour êtres analysés plus tard au court de la mission par l'instrument SAM (Sols 282/283, 286, 290, 368, 382, 394 et 408[6]). La dernière portion de l'échantillon de « Cumberland » présenté au mini laboratoire SAM, a été conservés durant plusieurs mois dans les chambres de stockage du système de préparation des échantillons de l'instrument CHIMRA, pour y être tamisé à plusieurs reprises durant la mission afin d'obtenir une poudre plus fine, et qui a été suivi à chaque fois par une série d'analyse effectuées par le spectromètre APXS du rover. Le gaz analysé par le spectromètre quadripolaire de SAM (QMS), après chauffage et pyrolyse sur différents palier de température de la deuxième portion de l'échantillon analysé de « Cumberland » (Figure 48), contenait de la vapeur d'eau (H_2O), de l'oxygène moléculaire (O_2), de l'hydrogène moléculaire (H_2), d'acide chlorhydrique (HCl), du dioxyde de carbone (CO_2), du dioxyde de soufre (SO_2), d'acide sulfurique (H_2S), du d'oxyde nitrique (NO) et un oxyde de chlore de la famille des perchlorates (Cl_xO_x). Le chromatographe en phase gazeuse (GC-MS) de

[4] New Results Send Mars Rover on a Quest for Ancient Life, Science Vol 342, 2013-12-09
[5] A Habitable Fluvio-Lacrustine Environment at Yellowknite Bay, Science Vol 343, 2014-01-24
[6] Evolved gas analyses of sedimentary rocks and eolian sediment in Gale Crater, Mars: Results of the Curiosity rover's sample analysis at Mars instrument from Yellowknife Bay to the Namib Dune, 12 July 2017

SAM a détecté la présence de chlorométhane (CH_3Cl), de dichlorométhane (CH_2Cl_2) et du tétrachlorure de carbone (CCl_4) à des concentrations plus fortes que ceux rencontré à « John Klein ». De la vapeur d'eau, du basalte (pyroxène, olivine, feldspath et plagioclase), de la magnétite, du sulfure de fer (pyrite, pyrrhotite), des sulfates (gypse, basanite) et des phyllosilicates (smectite) fut également détectés par le spectromètre à diffraction X de CheMin.

Les différents traitements qu'ont subis les échantillons de poudre de roche de « Cumberland », ont permis pour la première fois de dater les ingrédients minéraux d'une roche martienne. Le spectromètre quadripolaire (QMS) de SAM a mesurée la désintégration spontanée de l'isotope du potassium^{40} qui se transforme lentement par radioactivité béta en Argon^{40}, avec une durée de demi-vie de 1,25 milliards d'années. La présence de potassium dans l'échantillon a été détectée par le spectromètre APXS du rover lors des premières analyses pour identifier la composition chimique élémentaire des roches. L'Argon est un bon indicateur, car il s'agit d'un gaz noble inerte très volatile qui s'échappe très facilement quand la roche fond, et qui s'accumule piégé dans la roche quand celle-ci durcie. La poudre de roche de « Cumberland » est âgée entre 3,86 et 4,56 (~4,21) milliards d'années, soit le même âge que le système solaire, contre 3,6 à 4,1 (~3,7) milliards d'années pour le cratère « Gale ». Il s'agit de l'époque sortie tout droit de la période géologique du Noachien transitant vers le début du Hespérien (époque plus acide des sulfates), ou couvrant les époques comprises entre la fin du Theiikien et le début du Siderikien (voir le tableau des ères géologique Martienne dans l'introduction). Les mesures radiologiques effectuées par l'instrument RAD sur le rayonnement solaire et cosmique depuis 16 mois, combinées aux mesures du spectromètre quadripolaire (QMC) de SAM, après avoir chauffé l'échantillon de « Cumberland » à 890 °C pendant 25 minutes pour extraire et analyser la concentration de trois isotopes de gaz noble (^{21}Ne, ^{3}He et ^{36}Ar). Il s'agit d'isotope créé par collision nucléaire qui se produit à faible profondeur dans le sol entre deux et trois mètres, et qui survient lorsque des particules de très haute énergie rentent en collision avec l'un des nucléons (proton ou neutron) des atomes des roches contenue dans la couche argileuse de « YellowKnite Bay ».

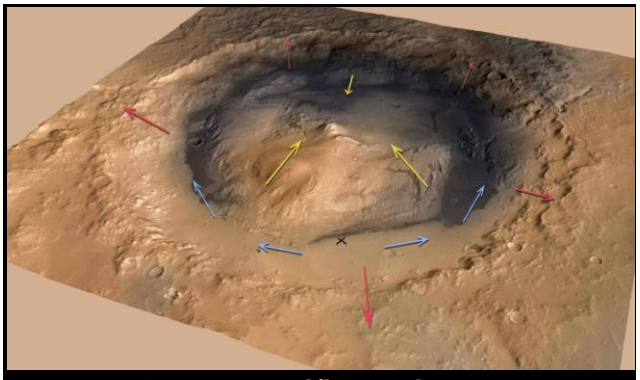


Figure 49 : Modélisation des vents
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/ESA/DLR/FU Berlin/MSSS)

Les analyses combinées de ses deux instruments indiquent que cette couche sédimentaire (« Sheepbed »), qui était jadis enfouis sous plusieurs mètres de profondeur sous la couche plus résistante et plus épaisse dénommé « Gillespie lake », a été exposé à la surface que très récemment entre 48 et 108 millions d'années. L'altération physique des couches sédimentaires à l'intérieur du cratère « Gale », a été essentiellement provoqué par des mécanismes d'abrasion résultant de l'action éolienne du vent, tourbillonnant et drainant des grains de poussière et du sable fin capable de mettre à jours des sédiments très anciens et longtemps préservé. Comme semble le démontré la présence de nodule plus résistant située à la surface des argiles avec leur lame de dépôt latérale, qui indique la direction des vents dominants à l'époque de leur formation (Figure 51 : image en bas à droite). D'autre résultat venant de la modélisation des vents effectués à partir des données fournis par la station de surveillance de l'environnement REMS du rover (Figure 49). Indique que les vents dominant sur

Mars suivent le cycle journalier des marées thermique, causé essentiellement par le réchauffement solaire de l'atmosphère martienne. Les vents locaux au fond du cratère sont ascendant le jour et descendant la nuit lorsque la température et la pression chute, avec des variations de température de plus de 80 °C et de plus de 10% pour la pression.

L'absence d'altération causée par le phénomène de lixiviation, ou lessivage et transport des minéraux et des sels sur de grande distance à travers « Peace Vallis » jusqu'au pied du mont « Sharp ». En plus de la présence de la forte abondance de magnétite et de smectite (minéraux argileux), formé par l'altération aqueuse des basaltes et de l'olivine, de l'absence de sulfates de fer et de la présence de sulfate de calcium (gypse), qui résulte d'une altération aqueuse peu acide sur le site. Indique que la formation des argiles s'est effectuée localement par diagenèse (ensemble de processus qui intervient dans la transformation des sédiments en roches sédimentaires) à partir de l'altération hydrique des dépôts sédimentaire, provenant de lave basaltique alcaline constituée de matériau magmatique mafique riche en Mg, Fe et Ca. Le découvert de matériaux magmatique de type felsique (silicate riche en aluminium) sur le site de « Rockness », semble également découler d'un processus d'érosion en milieux aqueux, ou le Mg contenue dans les silicates de fer a été remplacé par l'aluminium qui est plus soluble. Cela semble indiquer qu'une ligne de flottaison à perdurer durant une assez longue période de temps à la hauteur de « Rockness », et qu'une sorte d'étang boueux prenait place à « YollowKnife Bay » (dépôt lacustre). Il s'agit d'une époque géologique plus ancienne, contrairement aux sédiments de grès faiblement hydraté (anhydrite) riches en sulfate de fer et à la poussière martienne (régolithe) riche en hématite rencontré par le rover Opportunity dans les plaines sombres et basaltique de « Meridiani Planum », qui est d'une époque plus récente (Hespérien/Theiikien).

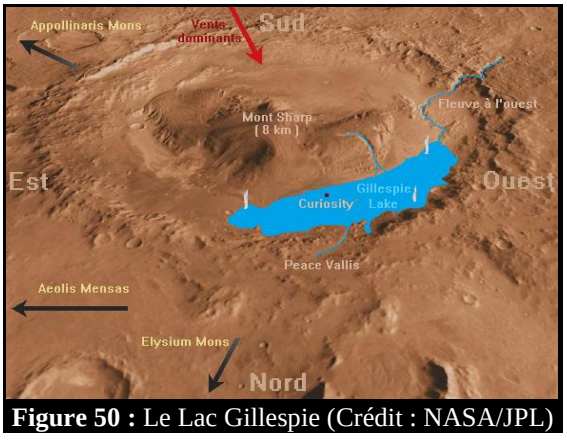


Figure 50 : Le Lac Gillespie (Crédit : NASA/JPL)

Les résultats obtenus pour le forage effectués à « YellowKnite Bay », qui a été creusé dans la couche géologique la plus base dénommé « Sheepbed ». Il s'agit d'une couche sédimentaire constitué surtout de fragment de grès arrondie et de mudstone, un sédiment fluviaux-lacustre à grain très fin composé d'argile et de boue, avec la présence de veines de dépôts de sulfate de calcium ($CaSO_4$) provenant de la précipitation en phase liquide d'une solution riche en sel. Avait déjà permis de trouver des indices sur la présence passé de l'écoulement de rivière à travers le cratère « Gale ». Avec les nouveaux résultats obtenus à « Cumberland », nous avons pour la première fois des preuves directes de l'altération chimique dans un environnement en milieu aqueux qui démontre que les ruisseaux et les rivières, qui s'écoulaient à travers les remparts du cratère « Gale » à différents époques, ont alimenté un lac d'eau douce froid de faible salinité qui se trouvait à la basse du mont « Sharp » à la hauteur du site d'atterrissage de Curiosity, et qui faisait environ 48 km de longueur sur 5 km de large. Le lac a été baptisé « Gillespie Lake » (Figure 50) et son origine remonterait peu de temps après la formation du cratère « Gale » il y a environ 3,7 milliards d'années, soit au tout début de l'époque du Siderikien (l'ère des oxydes ferriques) ou vers la fin du Noachien. À cette époque, Mars avait déjà perdu une grande partie de son atmosphère et l'ère des phillosilicates, à l'époque ou la planète était beaucoup plus chaude et humide, était déjà terminée depuis environ 400 millions d'années. Cette découverte de Curiosity est très importante, car elle

démontre que certaines argiles ont pu se former à des époques beaucoup plus récentes que celle qui était généralement admises, soit au tout début du Nonachien ou du Phyllosien, comme étant l'unique période géologique pour la formation des phillosilicates en milieu neutre.

L'histoire du lac commence peu de temps après la formation du cratère « Gale ». L'ère plus acide des sulfates du Theiikien (ou la fin du Noachien) avec ses grandes éruption de gaz volcanique et d'acide sulfurique viens de ce terminer. Cette époque correspond à celle explorer par le rover Opportunity à « Meridiani Planum », avec ses grandes étendus sombres composée en grande partie de pavées d'affleurements surmontés de dunes composée de basaltes, de grès de sulfate de fer, d'olivine et de concrétion minérale d'hématite formé en milieu aqueux acide peu profond emprisonnés dans une matrice de sédiment d'aspect boueux. La violence de l'onde de choc créé lors de la collision de l'astéroïde qui a formé le cratère « Gale », a fait remonter en surface l'eau des nappes phréatiques souterraine avec activité hydrothermale, et fait fondre le pergélisol en profondeur des régions environnantes. Comme la région de « Aeolis Mensas » situé au nord-est du cratère, caractérisé par ses plateaux au sommet plats et aux versants très abrupts entourés de zones d'effondrement et de vallées très profonde. L'eau s'est ensuite frayer un chemin à travers les remparts du cratère « Gale » en se chargeant de minéraux d'origine basaltique, puis s'est écouler à travers les vallées jusqu'au fleuve « Peace Vallis », pour finalement terminées sa course en formant un lac d'eau douce au pieds du mont « Sharp » (Figure 50). Ce phénomène semble s'être reproduit à deux autres reprises entre 3,81 et 3,65 milliards d'années avec l'éruption des volcans se trouvant au alentours, comme « Appollinaris Mons » situé vers l'est et « Elysium Mons » situé plus au nord. Les débâcles résultants de ses deux éruptions, ou lors de la chute de gros astéroïdes qui ont creusés les grands cratères d'impactes des alentours, semblent avoir creusés d'autres vallées ou des fleuves de plus grandes envergures qui ont réussi à percer les remparts du cratère « Gale ». Il s'agit de vallées qui ont été creusées lors de période de grande inondation, comme celle qui se trouve vers le sud-ouest et qui s'est déversé directement dans le lac « Gillespie Lake ».

Figure 51 : Bumps et forme vacuolaire (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Les premières inondations auraient apporté une partie des sédiments d'impact qui se sont déposé au fond du jeune lac, puis qui ont été par la suite altéré en milieux aqueux pour former la couche de dépôt « Sheepbed », composé de grès et d'argiles aux grains très fin et de concrétion sphérique (bumps) et d'autre de forme vacuolaire (Figure 18 et 51). Les veines blanches de sulfate de calcium observé par Curiosité, caractérisent l'infiltration de minéraux sulfatés en solution à travers les fissures de la roche, lorsque quelque temps après la collision des eaux souterraines profonde et surchauffée se sont mis à remonté vers la surface par des mécanismes hydrothermaux, et plus tard par l'infiltration d'eau de surface. À cette époque, le lac devait-être entouré d'un paysage montagneux recouvert de sommets enneigés avec à sa surface plusieurs geysers d'eau chaude jaillissant de plusieurs endroits à la fois. Les vallées sinueuses qui serpentine sur les flancs du mont « Sharp » en partant des sommets vers la base, ou se trouvent des petites collines de forme conique, semble indiquer que des glaciers ont jadis recouvert les sommets. À des périodes plus chaude les glaciers se sont mis à fondre, et l'eau s'est mis a dévalé les flancs de la montagne pour inonder le plancher du mis à fondre, et l'eau s'est mis a dévalé les flancs de la montagne pour inonder le plancher du

cratère. Ce phénomène de débâcle glacière semble intermédiaire, et les inondations suivantes ont apporté d'autres sédiments qui ont recouvert la couche de mudstone de « Sheepbed », pour former la couche plus épaisse aux grains plus grossier de « Gillespie Lake ». Chacune de ses épisodes doit avoir eu des effets qui ont durées quelques milliers d'années, revenant à l'occasion sur un intervalle de temps géologique pouvant avoir perdurée plusieurs dizaines de millions d'années car étant reliés aux différents paramètres orbitaux de la planète Mars. Soit le temps nécessaire pour former au fond du lac l'épaisseur des couches sédimentaire retrouvé à « Sheepbed » et « Gillespie Lake ». Plus tard à l'Amazonien ou au Siderikien, les vents dominant venant du sud-est et chargé de poussières martiennes ont fini par remplir les façades nord-est et sud-ouest du cratère situé entre les remparts et le mont « Sharp ». Ce dernier ayant servit d'écran protecteur pour préserver la base situé au pied du versant ouest ou les vestiges du lac ont été préservé de l'érosion. Mais la cause des inondations peut être multiple : chute d'astéroïdes ou de comètes, activité volcanique et hydrothermale, réchauffement atmosphérique relier aux différents paramètres orbitaux de la planète Mars.

Figure 52 : Le reste de Cumberland (MAHLI) (Crédit : NASA/JPL/MSSS/Emily Lakdawalla)

De nos jours il ne reste plus d'eau dans le cratère « Gale ». Mais toutes les conditions ont été réunies dans le passé lointain de cette région de la planète pour permettre le maintien des conditions d'habitabilité nécessaires, pour abriter et maintenir la vie microbienne élémentaire de type chemolithoautotrophe, ou mangeur de pierre. Se servant du soufre ou du fer contenu dans les minéraux des roches qui les entourent comme source d'énergie pour leur métabolisme. Il s'agit d'organisme qui pourrait ressembler à ce que nous retrouvons sur terre dans les grottes des mines d'or d'Afrique du Sud, ou encore sous les profondeurs abyssales des océans se trouvant à proximité des sources hydrothermales. L'astromobile ayant remplis son objectif sur la recherche d'indices sur les conditions d'habitabilités passé, va désormais poursuivre ses analyses de terrain dans le but de tenter de reconstruire le puzzle de la matière organique, et ceci, afin de savoir si la vie à put émerger dans le passer sur la planète Mars. Après avoir réussi la mise à niveau des logiciels de la version 11 et réamorcé le système informatique de bord du robot. Curiosity évacue définitivement le reste de l'échantillon de « Cumberland » qui était conservé dans CHIMRA sur le Sol 486 le 18 décembre 2013 (Figure 52), dans le but de nettoyer et de préparer l'instrument et la foreuse pour une nouvelle campagne d'échantillonnage. Les résidus de poudre et la grosseur des grains de l'échantillon jeté sur le sol martien, ont été par la suite étudiés au Sol 487 et 488 pour évaluer la performance du système de traitement d'échantillonnage de CHIMRA.

Durant les Sols suivants, le rover examine plus en détail l'usure prématurée de ses roues, qui a commencé sur le Sol 411 avec une petite perforation du revêtement d'aluminium de 0,75 mm d'épaisseur situé entre les lames de crampon plus épais et plus robuste des roues de l'astromobile. La grande dégradation que présentent les roues du côté gauche de Curiosity au Sol 490, et qui semble avoir accéléré depuis le Sol 463. Obligent les contrôleurs du robot de planifier un nouvel itinéraire de conduite et de déplacement sur le sol martien, qui consiste à éviter le plus possible les terrains trop rugueux et les rochers pointus enfouis dans le sol, qui peuvent déchirer ou perforer le revêtement d'aluminium des roues du rover. Il devient impératif de protéger et de

Figure 53 : Sol 494, après un parcours de 22,69 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

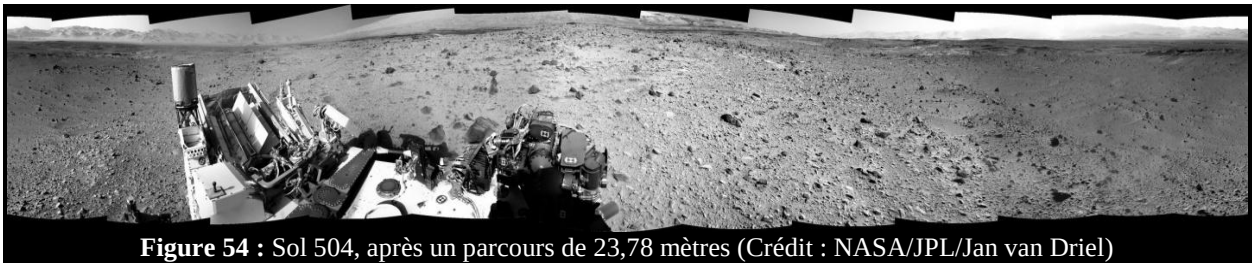


Figure 54 : Sol 504, après un parcours de 23,78 mètres (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

préserver les roues de l'astromobile contre toute usure prématurée qui serait trop importante, et l'usure des roues est devenue un facteur très important dans la planification des déplacements et des activités du robot Curiosity sur Mars. Et ceci, afin de donner une plus grande chance au robot pour traverser les champs de dune qui se trouvent à la base du mont « Sharp », et pour faire ensuite l'ascension des pentes vers le sommet.

L'astromobile qui n'a parcouru que douze mètres dans les 20 derniers Sols, se remet finalement en route vers le sud-ouest à une vitesse de 3 cm/sec au Sol 494 (Figure 53). Mais le robot s'arrête de nouveau après avoir parcouru une courte distance de 20,8 mètres. Ce temps

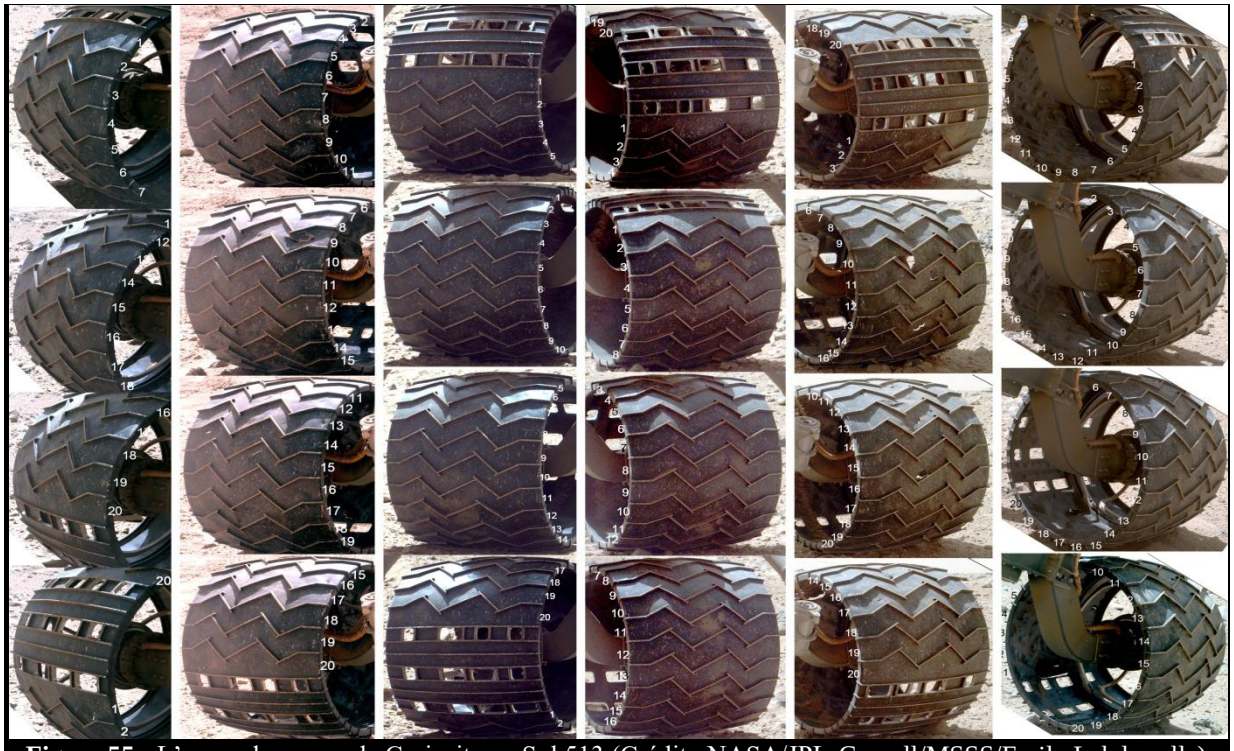


Figure 55 : L'usure des roues de Curiosity au Sol 513 (Crédit : NASA/JPL-Cornell/MSSS/Emily Lakdawalla)

Figure 56 : Harisson (Crédit : NASA/ JPL-Caltech/LANL/CNES/MSSS)

d'arrêt est utilisé pour permettre le téléchargement des nouvelles procédures du système de navigation autonome de Curiosity, dans le but de préparer le rover à passer le long congé des fêtes en effectuant des petites taches quotidiennes en mode automatiques. La route vers le sud-ouest en direction du point d'entré qui donne accès au mont « Sharp » est reprit dix jours plus tard sur le Sol 504 le 6 janvier 2014 (Figure 54). Après avoir parcouru une distance de 86,9 mètres en 4 séances de conduite quotidienne, le rover s'arrête de nouveau pour quelque jour dans le but d'amorcer une nouvelle campagne de diagnostique de ses roues entre les Sols 511 et 514 (Figure 55). Durant cette nouvelle pause, le rebot en profite pour étudier et analyser plusieurs cibles de roche qui se trouve a porté de son bras robotique, dont la cible « Crystal Laden » qui se trouve sur la roche « Harrison » au Sol 514 (Figure 56). Les instruments de Curiosity ont dévoilés que la composition des cristaux de forme allongés et de teinte claires de « Crystal Laden », incrustés dans la matrice plus sombre de la roche, est riche en feldspaths. Il s'agit de roche plus acide et riche en quartz et en aluminosilicates de sodium et de potassium (lave volcanique plus visqueuse, dont le magma est de type Andésite), tandis que le matériau de la matrice aux teintes plus foncées est dominé par le pyroxène, qui est une roche basique riche en silicate ferromagnésiens contenant du calcium (lave volcanique plus liquide, dont le magma est de type basaltique). Cette association minérale est typiquement représentative des roches ignées basaltiques intrusives (plutonique), dont la formation des phases cristallines s'effectue en profondeur dans un réservoir magmatique soumis à de forte pression et à des températures très élevées. Ses caractéristiques indiquent clairement que cette roche n'a pas été mise là par le volcanisme, mais qu'elle a été dégagée des profondeurs pour aboutir en surface lors de l'impact qui a créé le cratère « Gale ». L'astromobile reprend ensuite la route vers le sud-ouest au Sol 515, pour se diriger vers le troisième site d'intérêt géologique « Waypoint 3 » qui se trouve un kilomètre plus loin vers le sud-ouest, et qui a été baptisée « Kimberley ».

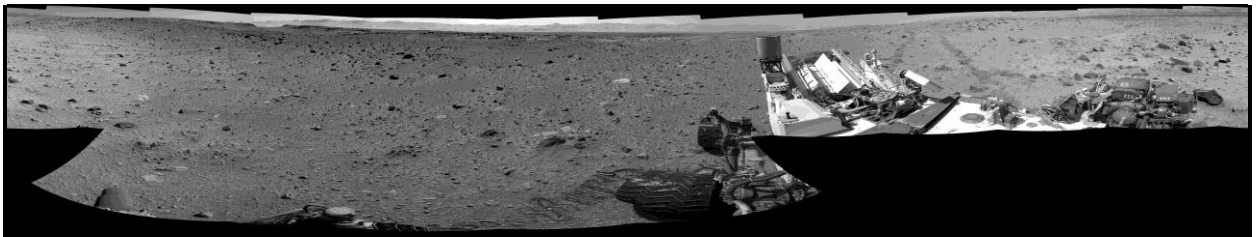


Figure 57 : Dingo Gap Sol 519, après 137,1 mètres en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

À l'approche du mont « Sharp », le décor à la surface de Mars commence à changer, passant de celui d'une plaine volcanique à celui d'un paysage un peu plus montagneux avec des crêtes peu élevées et de petits plateaux, ou serpentines des vallées peu profonde creusées par le ruissellement de court d'eau qui ont jadis dévalés les pentes du mont « Sharp ». Au Sol 519 le 21 janvier 2014, l'astromobile prend un nouveau panorama des lieux avec ses caméras de navigation NavCam qui fait ressortir la beauté du paysage martien qui se trouve tout autour du rover, et sur lequel on peu apercevoir le col « Dingo Gap » qui se dégageant au loin à l'horizon dans la partie gauche de l'image (Figure 57). Le col est à une distance d'environ 80 mètres du rover, et il est bordé de chaque côté par de petits escarpements composés d'empilements rocheux stratifiés d'environ un mètre de haut. L'entrée du col à une largeur de 15 mètres et elle est bloquée par une

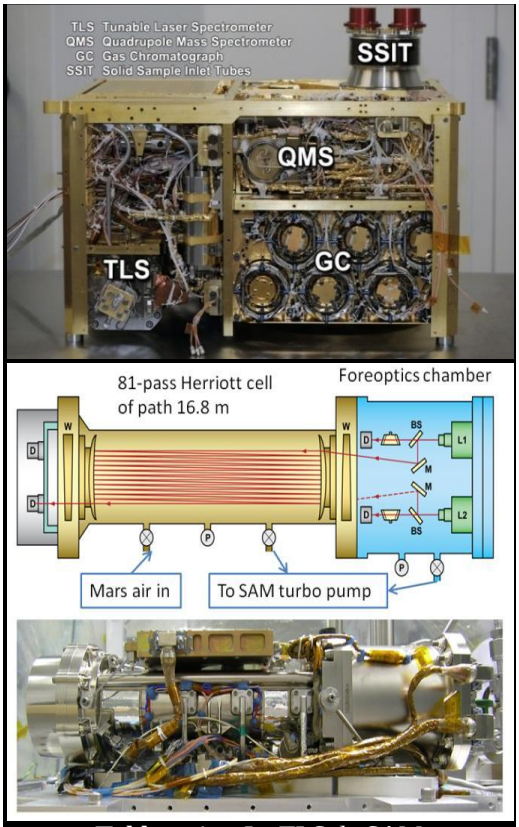


Tableau 1a : Le TLS de SAM
(Crédit : NASA/GSFC & NASA/JPL/Caltech)

petite dune de sable d'environ 70 cm de haut. Le col donne accès à une petite vallée dénommée « Moonlight Valley » qui s'élargie vers l'arrière, composé de parois qui présentes des zones d'éboulis et des zones lithologique très variées.

Le 16 décembre 2014, soit plus de 10 mois et demi plus tard dans le cours normal de la mission de Curiosity sur Mars (correspondant au Sol 841). La Nasa fait l'annonce de la détection de méthane dans l'atmosphère de Mars (Tableau 1b) lors de la réunion d'automne de l'American Geophysical Union[7-8]. L'étude est basée sur l'analyse des données acquissent par le spectromètre laser ajustable et accordable dans l'infrarouge (TLS) de SAM (Tableau 1a), et la Nasa présente en même temps les résultats de la détection définitive de la présence de matière organique dans les échantillons martiens recueillit lors de l'échantillonnage effectué à « Cumberland » (Tableau 1c). Le principe de fonctionnement du spectromètre accordable TLS est le suivant : L'instrument aspire de l'air martien dans une chambre de type cellule d'Herriot à deux canaux, l'échantillon est ensuite traversé par une impulsion laser dont la longueur d'onde est ajustable qui rebondit 81 fois entre deux miroirs. La lumière est ensuite conduite vers un spectromètre qui analyse les bandes d'absorptions à des longueurs d'onde spécifiques qui permettent d'identifier les isotopes plus lourds du carbone ou de l'hydrogène contenu dans le méthane (à 3,3 um), le dioxyde de carbone et l'eau.

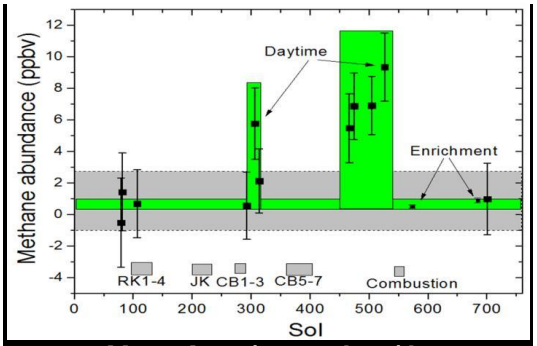


Tableau 1b : Détection de méthane
(Crédit : NASA/JPL/Caltech)

Les premiers résultats publiés sur le méthane en septembre 2013, basés sur l'analyse de 6 mesures atmosphérique effectuées entre le mois d'octobre 2012 et juin 2013, correspondant aux Sols 79, 81 et 106 près du site de « Rockness » et aux Sols 292, 306 et 313 près du site de « Cumberland ». L'ensemble de ses mesures avait fixé la limite de fond de la concentration de méthane dans l'atmosphère martienne à 0,69 +/- 0,25 ppbm (partie par milliard), soit un peu plus faible que la valeur qui était attendu par les scientifiques. Ce niveau correspond à une émanation de méthane provenant de la décomposition par photolyse de la matière organique apporté par les météorites, les comètes et la poussière interplanétaire, qui se dépose dans la poussière que l'on retrouve à la surface de la planète. Le méthane soumis aux radiations ultraviolettes solaires a une durée de vie moyenne de 300 ans dans l'atmosphère martienne. Mais durant une période de 60 Sols, couvrant

[7] Mars Methane Detection and Variability at Gale Crater, 2014-12-16
[8] Curious about Methane and Organic Molecules on Mars, Aaron Gronstal Nov 1 2015

le trajet de Curiosity situé entre le Sol 466 le 27 novembre 2013 jusqu'à l'entrée de « Dingo Cap » au Sol 526 le 28 janvier 2014. L'astromobile a mesuré à quatre reprises, soit aux Sols 466, 474, 504 et 526, une hausse soudaine et temporaire qui était dix fois supérieur à la limite de fond, allant jusqu'à une valeur de 7,19 +/- 2,1 ppbm. Suggérant ainsi une libération occasionnelle et locale de ce gaz dans le cratère « Gale » à l'approche de l'hiver martien, qui se disperse très rapidement par la suite, et dont l'emplacement de la zone d'émission aurait été situé plus au Nord de la position du rover. Le gaz aurait été poussé en direction du robot par les vents dominants ascendant qui soufflent du Nord vers le sud le jour en se réchauffant, et du sud vers le nord en se refroidissent une fois la nuit tombée. L'air devenant plus dense la nuit en ce refroidissant, un courant descendant se forme qui dévalent les pentes du mont « Sharp » jusqu'au fond du cratère.

En plus, dans la même annonce, la Nasa confirmait la détection définitive des premières molécules organiques effectué par l'instrument QMS (le spectromètre de masse quadripolaire), qui analyse le poids moléculaire du gaz, et par le chromatographe en phase gazeuse de SAM (GC-MS), dont l'objectif est de séparer les molécules organiques complexes selon leurs masses et leurs isotopes. La détection des molécules organiques proviennent des analyses effectuées sur plusieurs portions de l'échantillon recueillis lors du forage exécuté à « Cumberland » dans le mudstone de « Sheepbed » (contenant de l'argile montmorillonite). Il s'agit de la portion n° 3 analysé au Sol 290, de la portion n° 5 incluant une séance de préchauffage à 200 °C et d'une pyrolyse à 875 °C effectuée sur le Sol 368, et pour finir de la portion n° 6 qui a inclut une séance de préchauffage suivit d'une d'ébullition à 250 °C pendant 27 minutes et d'une pyrolyse à 875 °C au Sol 382. Les molécules organiques trouvées à partir du Sol 290 le 31 mai 2013 ont des atomes de chlore (Tableau 1c), et comprennent le chlorométhane (CH_3Cl) (pic 1), le dichlorométhane (CH_2Cl_2) (pic 2), le trichlorométhane ou chloroforme ($CHCl_3$) (pic 3), le tétrachlorure de carbone (CCl_4) (pic 4), le dichloroéthane ($C_2H_4Cl_2$) (dichloroalcanes pic 5), le dichloropropane ($C_3H_6Cl_2$) (dichloroalcanes pic 6), le dichlorobutane ($C_4 H_8Cl_2$) (dichloroalcanes pic 7) (en dessous de la limite de quantification) et le chlorobenzène (C_6H_5Cl) (pic 8) entre 150 et 300 ppbm, première preuve formelle de la présence d'une molécule organique d'origine non terrestre à la surface de Mars. La détection de ses huit molécules organique s'est avérée plus difficile que prévu en raison de la présence de molécules très oxydante et réactif, comme les perchlorates contenu dans le sol martien, et de l'utilisation de l'adjuvant MTBSTFA (N-méthyl-N-tert-butyldiméthylsilyle trifluoroacétamide) qui a fuit de l'une des chambre humide de l'instrument et du solvant DMF (diméthylformamide) utilisé pour le nettoyer de l'instrument SAM avant le départ pour Mars. Mais après plusieurs essais effectuer sous vide sans échantillons de poudre de roches et chauffé à 300 °C pendant plusieurs minutes, a permis d'écarter les soupçons sur la non présence de matière organique, comme le dévoile les résultats du graphique du tableau 1c. Il est à noter que le chlorométhane, le dichlorométhane et le

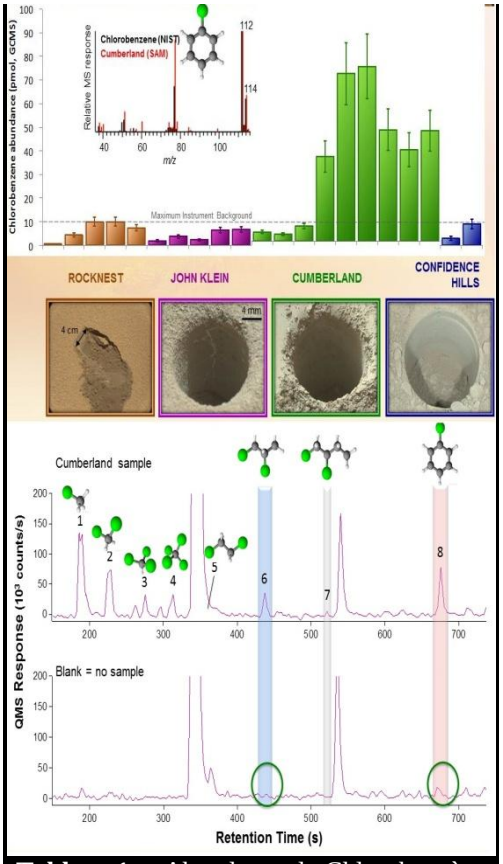


Tableau 1c : Abondance du Chlorobenzène (Crédit : NASA/JPL/Caltech)

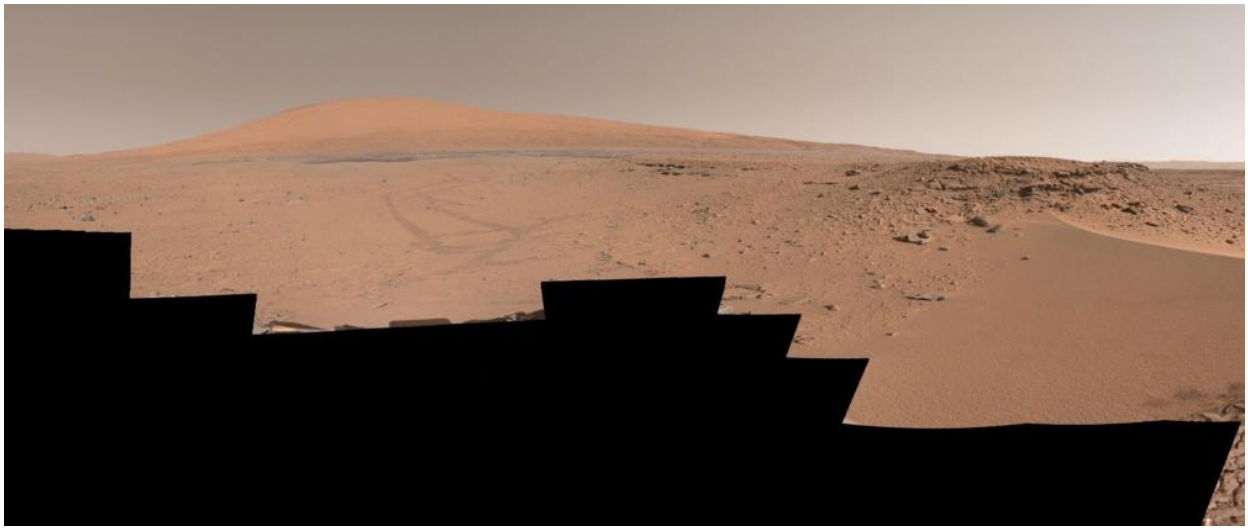


Planche 10 : Panorama couleur de Dingo Gap pris au Sol 530 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Justin Cowart)

chlorobenzène ont été détectés comme produits de pyrolyse des sols analysés par les instruments Viking GC-MS qui ne contenait pas de MTBSTFA. Les boules vertes représentent des atomes de chlore, les boules noirs des atomes de carbone et les boulles blanches à l'hydrogène. Ces composées organiques ne sont pas originaires de la planète Mars, mais dérive des procédés d'analyse de SAM qui en chauffant des échantillons contenant de la matière organique en présences d'agents très oxydant à la surface de Mars, comme le perchlorate, fabrique des composées secondaire organochlorés. Première détection confirmée de molécules organiques de la familles des hydrocarbures aromatiques comme le benzène (C_6H_6) et le toluène (C_7H_8), et des molécules organique soufrée comme le thioéther diméthylsulfure (CH_3SCH_3) lors de l'expérience EGA effectuée au Sol 282.

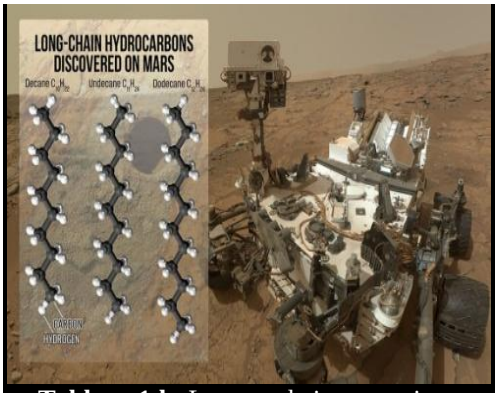


Tableau 1d : Longue chaine organique (Crédit : NASA/Dan Gallagher)

Une étude publiée plusieurs années plus tard dans la revue PNAS le 25 mars 2025[9] sous la direction de Caroline Freissinet du CNRS, indique la présence de molécule organique faisant partie de la famille des alcanes linéaire dans les échantillons de poudre de roche analyser par l'instrument SAM à « Cumberland » (Tableau 1d). Les analyses ont été effectuées sur différents Sols (282/283, 286, 290, 368, 382, 394, 408), et dont l'un des échantillons (portion no 6 Sol 394) a été préservé dans SAM durant environ 1 260 Sols en présence de vapeurs de l'adjuvant MTBSTFA avant pyrolyse (~850 °C), permettant ainsi au solvant de réagir avec les molécules organiques présentes dans l'échantillon durant toute la traversée de « Yellowknife Bay » jusqu'au pied du mont « Sharp ». Du MTBSTFA a été scellé à l'intérieur de sept coupelles métallique de dérivatisation présentes dans l'instrument SAM pour l'expérience de chimie humide. Il s'agit de la découverte de longue chaine de carbone moléculaire composé de 10 à 12 atomes de carbone tel que le décane ($C_{10}H_{22}$), undécane ($C_{11}H_{24}$) et le dodécane ($C_{12}H_{26}$), pouvant provenir de la dégradation des fragments d'acides gras préservés dans l'échantillon.

[9] Long-chain alkanes preserved in a Martian mudstone, march 24 2025

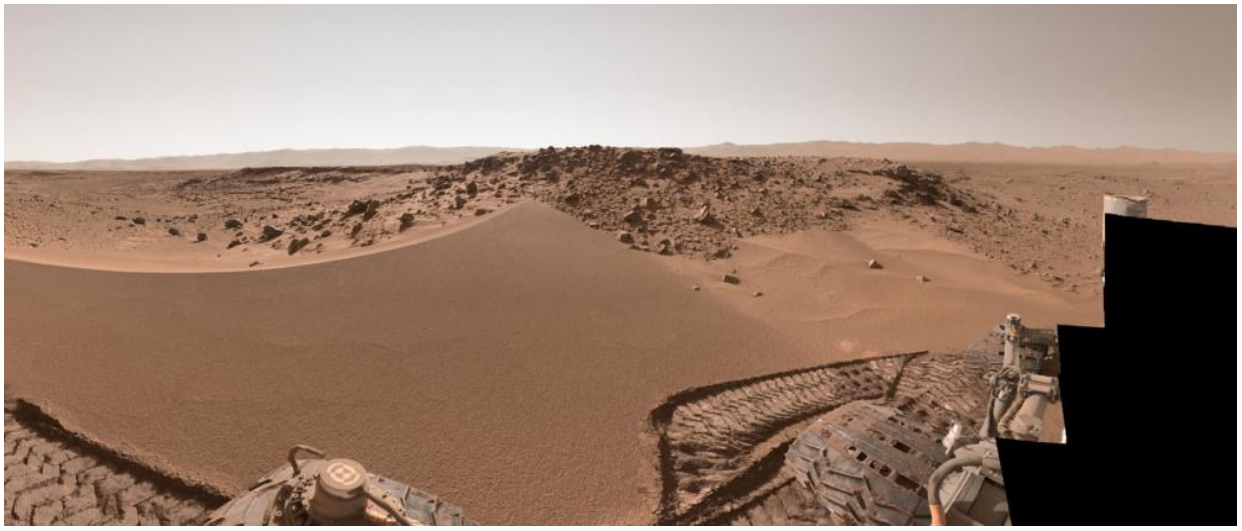


Planche 10 : Suite du panorama couleur pris au Sol 530 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Justin Cowart)

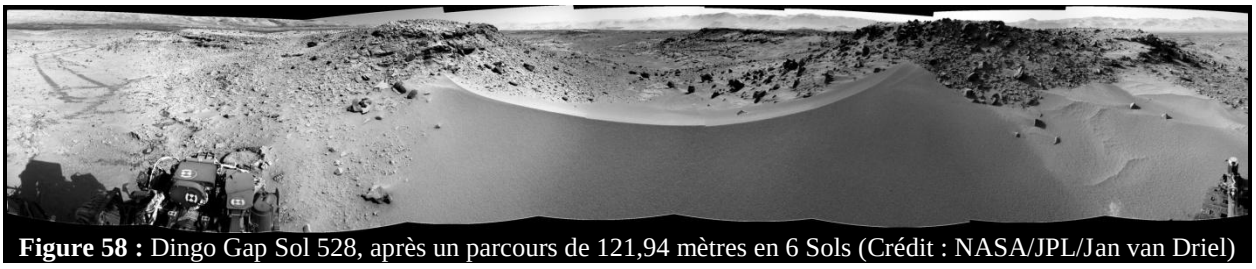


Figure 58 : Dingo Gap Sol 528, après un parcours de 121,94 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

Figure 59 : Sol 538, après un parcours de 60,26 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 60 : Sol 541, après un parcours de 70,86 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

Figure 61 : Sol 548, après un parcours de 267,27 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Ce sont les plus grosses molécules organiques découvertes sur Mars à ce jour.

Après l'analyse des images du terrain, la décision fut prise de poursuive la mission en se déplaçant vers l'entrée de « Dingo Gap » pour voir si le robot peut passer sans prendre trop de risque d'enlisement. Neuf jours plus tard sur le Sol 528 le 30 janvier 2014, le rover se place devant la dune situé à l'entrée du col pour étudier sa texture et ses propriétés physique (Figure 58). La surface de la dune présente une consistance plus solide et forme une croûte mince à sa surface. Deux jours plus tard sur le Sol 530, Curiosity entreprend un nouveau panorama couleur des lieux avec la caméra MastCam de 34 mm (Planche 10). L'astromobile traverse la dune de sable entre les Sols 533 et 535, et après l'étude de la composition d'une veine claire au Sol 538. Le rover reprend la route vers l'ouest en parcourant 43,58 mètres à travers « Moonlight Valley » (Figure 59), puis 70,86 mètres supplémentaire sont parcourus au Sol 540 ou l'astromobile franchit le cap de son cinquième kilomètre parcourus à la surface de Mars. Un nouveau panorama couleur est pris le lendemain au Sol 541 (Figure 60) à la hauteur de la petite butte « Mount Nulasy », qui se trouve juste à droite des traces de roues de Curiosity. On peut voir dans la partie gauche de l'image, les traces de roues de l'astromobile qui s'éloigne lentement de « Dingo Gap » à travers « Moonlight Valley ». Et dans la partie droite de l'image, ont peut distinguer les régions de « Violet Valley » et de « Wilson Cliff » vers lequel se dirige le rover.

Figure 62 : Bungle Bungle (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Le solstice d'hiver arrive au Sol 544 le 15 février 2014, et le même jour l'astromobile fait la découverte d'une nouvelle roche ignée non altérée riche en feldspath sur la cible baptisée « Bindi ». Il s'agit d'une roche flottante provenant de l'extérieur qui a été dégagée et propulsée dans les airs, puis amenée là lors d'une collision avec un météorite ou lors d'une éruption volcanique. Trois jours plus tard à la hauteur du site de « Scrutons », le rover essai la conduite en marche arrière à travers « Violet Valley », pour voir si cette nouvelle stratégie de conduite peut aider à économiser l'usure des roues. Le lendemain au Sol 548 à la hauteur du site de « Junda », juste avant de reprendre la route en marche arrière vers le sud-ouest en direction de « Kimberley ». L'astromobile fait un nouveau cliché panoramique des lieux à l'aide de ses caméras de navigation (Figure 61), sur lequel on peut voir en arrière plan le sommet du mont « Sharp » qui surplombe un alignement d'empilement lithologique faiblement incliné composé de pavés d'affleurements finement feuilleté. Curiosity étudie ensuite l'affleurement « Bungle Bungle » au Sol 549 et 550 (Figure 62), constitué d'une couche de conglomérats composé de petites roches et de galet de forme légèrement arrondie cimenté dans une matrice de sable fin. Le rover reprend la route en longeant « Wilson Cliffs » et l'affleurement « Kylie » entre les Sols 551 et 559, avant de tourner vers l'ouest puis de nouveau vers le sud-est au Sol 568 en serpentant à travers de petites vallées qui débouchent sur des cols très étroits. Et ceci, dans le but de contourner une série de petites buttes finement stratifiées qui bloque le chemin vers « Kimberley ». Au Sol 569 le 13 mars 2014, le rover franchis le dernier col et parcours une distance de 102,55 mètres qui le place directement en vue des trois monticules coniques de « Kimberley »[10], qui se trouve vers le sud à une distance d'environ 150 mètres devant l'astromobile. Il s'agit de la quatrième séance de roulement ou le robot franchis une

[10] Overview of the Mars Science Laboratory mission: Bradbury Landing to Yellowknife Bay and beyond, 12 May 2014

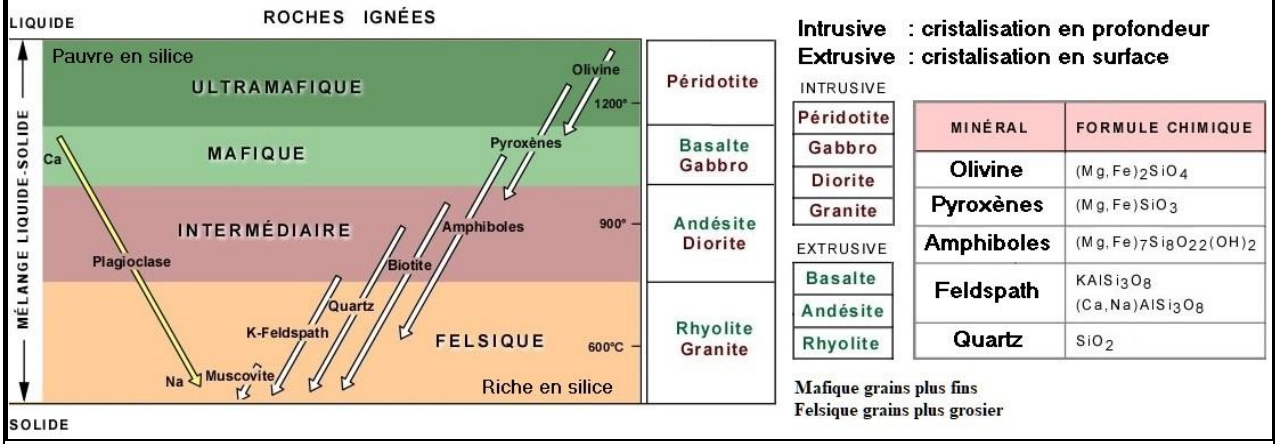
Figure 63 : Sol 564, après un parcours de 373,73 mètres en 12 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

distance quotidienne supérieure aux cent mètres.

La mission de Curiosity sur la planète Mars a compilé des preuves convaincantes que le bassin du cratère « Gale », dont la formation remonte entre 3,6 et 4,1 milliards d'années (transition Noachien/Hespérien ou Phyllosien/Siderikien), a accumulé des sédiments à plusieurs reprises transportés par des fleuves et des rivières marginales dans des lacs, et qui ont probablement persisté pendant des millions d'années (et entre 100 et 10 000 ans pour les périodes plus récentes). La formation du cratère est venue juste après une époque de transition (4,2 milliards d'années) qui a laissée une épaisse couche sédimentaire, une époque ou la planète était beaucoup plus chaude et humide et qui était déjà terminée depuis environ 400 millions d'années lors de la formation du cratère « Gale ». Les strates de roches sédimentaires rencontrées le long du parcours du rover sont interprétées comme témoignant d'environnement fluvial, deltaïque, lacustre et éolien, qui a par la suite été divisées en différents groupes ou unité stratigraphique (Bradbury et Mt. Sharp). Voir l'annexe en fin d'ouvrage pour plus de détail à ce sujet.

Une formation géologique (ou lithostratigraphique) désigne un ensemble de strates (couches géologiques) regroupées sur la base de leur nature chimique et minéralogique (lithologie), et de leurs relations spatiales et temporelles classé selon la taille des grains de roche (stratigraphie). Le premier groupe de la colonne stratigraphique du cratère « Gale » à la base du mont « Sharp » est représenté par le groupe Bradbury d'une épaisseur de 100 mètres, qui comprend les roches les plus anciennes et les plus basses explorées par Curiosity. Le groupe Bradbury se compose de dépôts fluvio-deltaïques, formations liés à la fois aux fleuves et à leurs deltas composées de stratifications entrecroisées, qui suggère des épisodes de chenaux fluviaux, de rivières et de lacs, ou de dunes de sable soufflées par le vent avec des intervalles le long du fond du cratère composé de mudstone, de Sandstone et de conglomérats. Les mudstones sont des dépôts que l'on retrouve en bordure de lac composé d'argile et de boue à grain très fin située à la limite de la résolution spatiale pour toutes les caméras du rover, et les Sandstones sont des dépôts de grès éolien dont les grains plus grossier sont de la taille du sable. Le deuxième groupe est représenté par le Mt. Sharp, qui regroupe la formation Murray d'une épaisseur de 300 mètres composé de dépôts lacustre (mudstone), et de la formation Stimson composé de dépôts fluvio-deltaïques et lacustre constitué de grès mafique (Sandstone). Les grès qui compose les dépôts de la formation Stimson font partie du sous groupe Siccar Point (du groupe Mt. Sharp) qui recouvrent en discordance les buttes du groupe Mt. Sharp composée de dunes de sable basaltique lithifiées.

Distinction entre roche Mafique et Felsique



Les données géochimiques des sédiments éoliens rencontrées dans le cratère Gale montrent des sables et des roches constitués de grains de feldspath grossiers (roche felsique) et des matériaux mafiques aux grains plus fins. La plupart des sables éoliens sur Terre sont dominés par le quartz qui est le minéral le plus résistant à l'érosion et aux intempéries physiques et chimiques. Dans le magma (roche fondue) il existe quatre type de roche silicatée (ignées) qui selon leur densité, la teneur en silice (SiO2), la pression, la chaleur de cristallisation fractionnée ou de fusion partielle, se divise en quatre famille selon le réseau cristallin. Soit ultramafique (ultrabasiques : péridotite roche principalement du manteau), mafique (basalte, gabbro), intermédiaire (andésite, diorite) et felsique (rhyolite, granite). Les roches mafiques (ferromagnésien) riche en olivine, pyroxènes, amphibole et biotite, sont plus réactives et facilement altérés par l'eau dans les environnements sédimentaires, en particulier l'olivine dans les fluides aqueux. Ils sont donc plus rares dans la croûte continentale terrestre qui est composée en grande partie de matériaux felsiques (alumino-silicatés) riche en silice de densité plus faible donnant des magmas avec lave plus fluides. Distinction entre les deux grands groupes de roche ignées, soit les roches extrusifs à fins cristaux (volcans sous-marins ou continentaux) qui provient de couler de lave du magma qui se cristallise en surface (roche sédimentaire et métamorphique), et intrusive à cristaux plus grossiers formé plus lentement en profondeur (roche plutonique).

Les feldspaths sont des minéraux faisant partie des roches felsique (granite, rhyolite) au même titre que le plagioclase et le quartz. La rhyolite se forme à partir du refroidissement des magmas de composition granitique. Ce sont des minéraux riches en silicium et aluminium rencontré dans la quasi-totalité des roches magmatiques et métamorphiques sur Terre (volcanique, plutonique). Les roches felsiques sont originaires de lave extrusifs de type andésite a refroidissement plus rapide (lave fluide riche en silice et en gaz de type explosive) qui se cristallise à plus faible température que les roches mafiques plus dense à refroidissement plus lent. Les andésites résultent de la solidification en surface de magma et de laves de composition intermédiaire, elles sont plus rare sur Mars car n'ayant pas de volcanisme de subduction. Le basalte est une roche mafique plus dense essentiellement constitué d'olivine, de pyroxènes et de feldspaths. Elle forme des laves extrusives plus rugueuses ou plus visqueuses s'écoulent plus difficilement que les laves andésite plus liquide et s'écoulant rapidement composé de feldspaths riche en silice. La lave mafique crée du basalte tandis que la lave felsique produit des roches andésitiques et rhyolitiques, mais les deux peuvent donnée des argiles riche en Fe-Mg pour les basaltes ou en Al pour les andésitiques.

*Les serpentines $(Mg, Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$, roche sédimentaire de la famille de minéraux du groupe des silicates, sous-groupe des phyllosilicates qui résulte de l'altération aqueuse de l'olivine et des pyroxènes des roches ignées ultramafique et mafique des péridotites. (Planète Terre de Pierre-André Bourque)

DE KIMBERLEY À PAHRUMP HILLS (Sol 574 à 752)

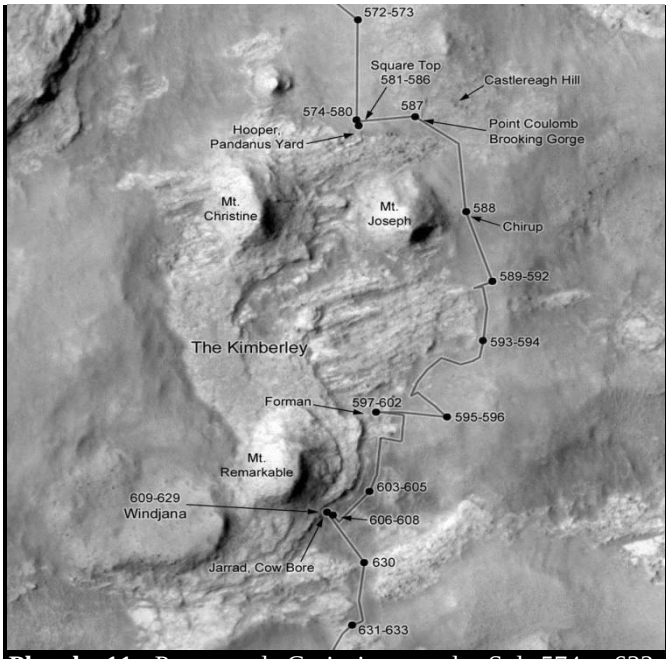


Planche 11 : Parcours de Curiosity entre les Sols 574 et 633. Photo d'arrière plan obtenue grâce aux données fournies par la caméra HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 11 avril 2014. Position et trajet du rover par Phil Stooke.

Le rover Curiosity arrive finalement à la limite nord de « Kimberley » (Waypoint 3) au Sol 574 le 19 mars 2014, entres les monticules de forme coniques baptisées « Mt Christine » et « Mt Joseph » d'environ six mètres de hauteur chacun (Planche 11). Le site de « Kimberley » (Sols 574-630) a été choisi comme point de passage majeur de la mission, en raison de la diversité des types de roches exposées à proximité les unes des autres visibles sur les images orbitale de haute résolution de l'instrument HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Cinq jours plus tard au Sol 579, le robot entame avec ses caméras de navigation NavCam un nouveau panorama noir et blanc de 360° qui dévoile le magnifique paysage martien qui se trouve tout autour du rover (Figure 64). En avant plan sur l'image situé juste devant l'astromobile, nous retrouvons un ensemble d'affleurement rocheux constitué d'une couche sédimentaire de grès stratifiée de plusieurs dizaines de mètres de longueur sur environ 0,5 mètre de hauteur, suivit au-dessus et un peut plus loin derrière par les deux monticules dénommés « Mt Christine » à droite et « Mt Joseph » à gauche, et encore un peu plus loin derrière situé à la limite sud de « Kimberley » entre les deux monticules précédents se trouve la butte « Mt Remarkable ». La région de « Kimberley » est caractérisée par quatre types de terrains sédimentaire fortement stratifié, qui semblent avoir subit une alternance d'altération dans un milieu aqueux à différentes époques. Le rebot est à la recherche d'un site ou il pourra trouver des échantillons de matériel ancien qui ont été

Figure 64 : Sol 579, après un parcours de 331,92 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

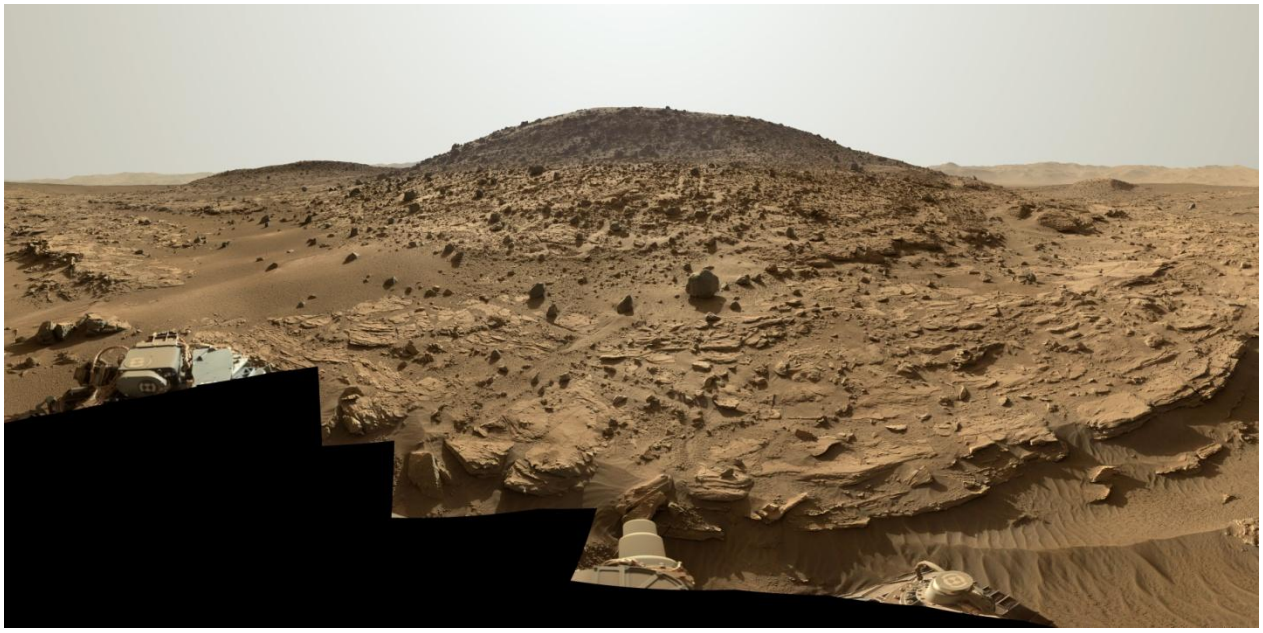


Figure 65 : Sol 610, après avoir parcourus 192,92 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

Figure 66 : Sol 589, après avoir parcourus 102,72 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

fraîchement exposé par l'érosion éolienne, mais qui auraient également été à l'abri des radiations cosmiques et du rayonnement ultraviolet solaire sur une grande période de temps depuis leur formation. Et ceci, afin de mieux connaître la nature exacte des matériaux de remplissage qui cimentes les grains de sable (argile ou quartz) qui compose les grès sédimentaires situé à la base des escarpements rocheux de « Kimberley », mais aussi pour une éventuelle détection de matériel organique qui sera effectuée par les instruments SAM et CheMin lors du troisième forage.

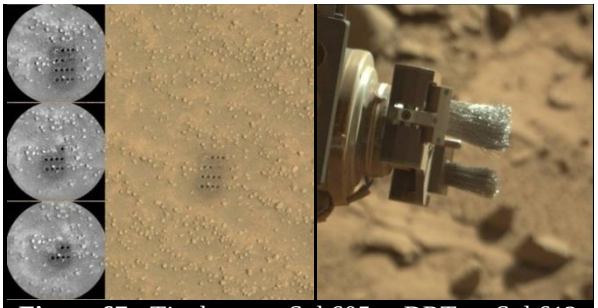


Figure 67 : Tirs laser au Sol 605 et DRT au Sol 612 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Après avoir fait une pause de deux semaines à explorer les lieux, et à préparer les instruments du rover pour faire une nouvelle campagne d'échantillonnage et de forage qui sera effectué un peu plus loin. L'astromobile reprend la route vers l'Est au Sol 587 en contournant la butte « Mt Joseph » par le nord-est (Figure 66), dans le but de sonder le terrain et de se dirige vers un nouveau site de « Kimberley » qui se trouve plus au Sud. Et durant le dernier trajet, l'astromobile franchis le cap de son sixième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars le 4 avril 2014. Après avoir parcourus 295,64 mètres en 35 Sols depuis son arrivé à « Kimberley » (soit 11 séances de roulements entre les Sols 574 et 609), Curiosity se positionne devant un banc

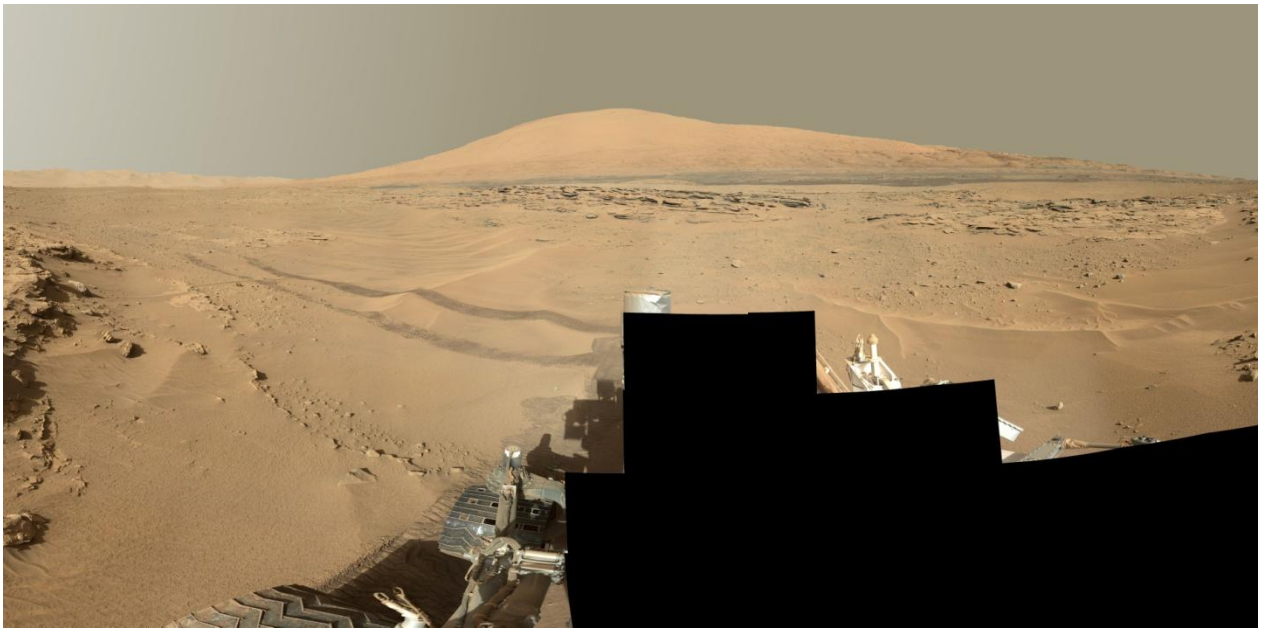


Figure 65 : Suite Sol 610 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

Figure 68 : Autoportrait Sol 613 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/O. de Goursac)

d'escarpement rocheux qui se trouve à la base du versant sud-est du monticule « Mt Remarkable » au Sol 609 le 23 avril. Le rover est désormais situé juste en face d'un affleurement rocheux qui sera baptisée « Windjana » (Sols 609-629), et qui va devenir la cible pour la troisième collecte d'échantillon de forage de la mission (Figure 65). L'affleurement « Windjana » est visible vers le centre de la partie inférieure de l'image de gauche du magnifique panorama couleur de 360° de la figure 65 (MastCam de gauche de 34 mm). Trois jours plus tard sur le Sol 612, après avoir étudiée la surface de l'affleurement « Windjana » avec différents instruments et trouver une cible pour faire différents évaluations préparatoires. L'astromobile actionne le moteur rotatif de son outil de brossage anti-poussières DRT (Dust Removal Tool), composé de deux brosses de fils métallique situées à l'extrémité du porte du bras robotique (Figure 67), dans le but de nettoyer la poussière rougeâtre qui se trouve à la surface de la cible le long d'une petite ligne de fracture, et d'analyser ensuite la surface nettoyer avec l'APXS et l'imager MAHLI.

Le lendemain au Sol 613, le robot effectue le troisième autoportrait de la mission composée d'une mosaïque de 75 images prisent à l'aide de la caméra haute résolution MAHLI (Figure 68). Une deuxième cible située juste sous la première est choisie pour effectuer le premier test de forage au Sol 615, qui consiste à creuser un trou peu profond de 1,6 cm de diamètre sur environ 2 cm de profondeur. Lors du perçage de la roche, les vibrations causées par la percussion de la foreuse ont provoquées des mini glissements de terrain tout autour de l'affleurement (Figure 69:a). Cette première activité de forage avait pour objectif d'évaluer la stabilité de la foreuse ainsi que la grosseur des grains, afin de savoir si la poudre de roche

dégagée présentait une texture assez fine pour subir un traitement par le système mobile d'acquisition et de manipulation d'échantillon de CHIMRA, qui doit par la suite diriger les échantillons à travers un tube de transfère qui interface l'instrument CHIMRA au mini laboratoire d'analyse chimique SAM et d'analyse minéralogique CheMin. Les activités préparatoires ont permis d'évaluer certaine propriété physique de « Windjana », tout en permettant de voir la texture du matériau qui se trouvait à l'intérieur du trou foré. Des analyses ont par la suite été effectuées sur les résidus de poudre de roche avec les instruments de télédétections MastCam, ChemCam et le laser LIBS, ainsi que par les instruments de contactes MAHLI et le spectromètre APXS. Les premières analyses indiquent que la consistance de « Windjana » est plus résistante, et que la texture des résidus de la poudre de roche et du matériel qui tapisse les parois interne du trou de forage est nettement plus sombre que ceux rencontrés lors des campagnes de forage effectuées un an plus tôt à « Yellowknite Bay ». Le véritable forage avec prélèvement d'échantillon est exécuté au Sol 621 le 6 mai 2014 (Figure 69:a), sur une cible située juste au-dessus du forage de test, en creusant un trou de 1,6 cm de diamètre sur 6,5 cm de profondeur. Il s'agit du quatrième emplacement depuis le début de la mission de Curiosity sur Mars après « Rocknest » (Sol 69), « John Klein » (Sol 182) et « Cumberland » (Sol 279), à subir une campagne d'analyse chimique et minéralogique complète par les instruments scientifiques SAM et CheMin.

Figure 69 : Sol 627 et 628
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Après la séance de forage, la poudre de roche récoltée par la vis sans fin du foret de la foreuse est dirigée vers CHIMRA pour subir différents traitement durant les prochains Sols. Les premiers échantillons après tamisage son livrer à CheMin au Sol 623 et à SAM au Sol 624. Le traitement des échantillons va s'effectuer durant la nuit sur plusieurs jours, afin d'économiser l'énergie et de permet à l'astromobile de poursuivre sa mission sur Mars et de rester actif le jour. Les analyses de l'expérience EGA indique pour la premièere fois la présence de la sanidine $K(AlSi_3O_8)$, un feldspath potassique. Le laser LIBS de ChemCam est utilisé au Sol 628 pour dessiné un alignement verticale de 8 trous dans la paroi interne du forage, et un deuxième regroupement composé de 10 trous est exécuté dès le lendemain pour dessiner à l'extérieur du trou un alignement horizontale à la surface de l'affleurement (Figure 69:b). L'affleurement « Windjana » est une roche riche en magnétite et est la première roche de grès analysée sur Mars par Curiosity (dépôts éoliens de la formation Stimson). La photo (Figure 69:b) a été prise par l'imageur haute résolution MAHLI après la tombée du jour afin d'atténuer l'effet d'ombrage causé par l'ensoleillement, et en utilisant comme seule source d'éclairage des LED à émission de lumière blanche pour mieux voir à l'intérieur du trou foré. Les premiers résultats d'analyses de ChemCam dévoilent la présence d'un mélange plus varié de matériaux argileux, avec la détection de feldspath riche en potassium. La présence de matériaux felsique, comme les feldspaths retrouvée dans « Jake Matijevic », « Harisson » et maintenant dans « Windjana ». Indiquent que les grès de « Windjana » ont subit des transformations géologiques très complexes dans le passé, incluant plusieurs phase volcanique de cristallisation, comme la fusion partiel de roche ignées, contrairement aux matériaux mafiques qui recouvrent les pleine basaltiques de « Meridiani Planum ». Après avoir passé plus de trois semaines au pied de la plus grande des trois buttes de « Kimberley ». L'astromobile quitte définitivement le troisième site de forage de la mission au Sol

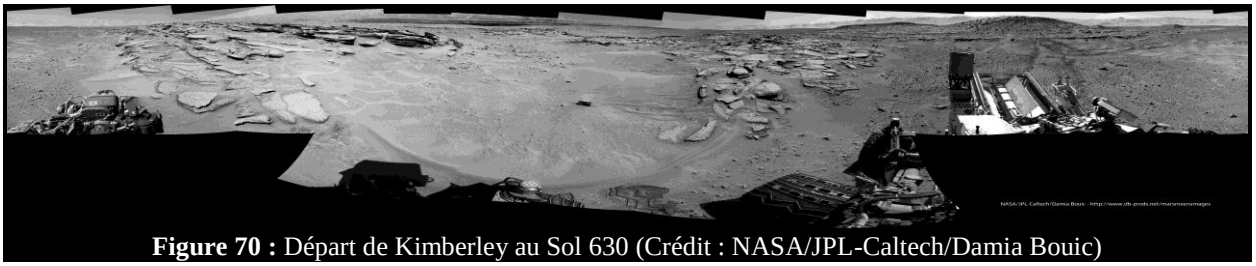


Figure 70 : Départ de Kimberley au Sol 630 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 71 : Sol 637, après un trajet de 290,31 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jan van Driel)

630[11] le 15 mai (Figure 70), en parcourant une courte distance de 25 mètres en marche arrière suivit de 29,5 mètres supplémentaire dès le lendemain, en se déplaçant vers le sud-est en direction du point d'entré dénommé « Murray Buttes » situé à la base des pentes inférieurs du mont « Sharp » à environ 4 km de distance. Les roches analysées à « Kimberley » constituées de dépôts de grès éoliens ont été regroupé dans une nouvelle formation dénommé Kimberley. Le groupe Bradbury (Sols 0-750) regroupe désormais les formations Yellowknife Bay (dépôts lacustre, mudstone) et Kimberley (dépôts fluvio-deltaïques et lacustre, Sandstone).

Durant le trajet du rover à travers la pleine de « Aeolis Palus » sur le plancher du cratère « Gale », en serpentant à travers des vallées sinueuses peu profonde bordé de buttes de un et six mètres de hauteur aux sommets plats surmonté de gros cailloux aux teintes foncés, qui ressemblent à des éjectas résultant d'avènement beaucoup plus récents. L'astromobile à rencontré sur sa route des conglomérats de roches sombres aux formes arrondis, des pavées d'affleurements formés de grès et des escarpements composés d'empilements rocheux aux tons claires et inclinés qui tapissent les parois interne des vallées. Les affleurements rocheux de cette couche sédimentaire présente une texture formé d'une superposition de fine lamelle de grès avec des stratifications obliques, comme ceux rencontré au Sol 120 à « Shaler », dont certaines lamelles plus résistantes à l'érosion causé par le vent chargé de fine poussière de sable, semblent sortir tout droit du sol martien maintenue en suspension par la faible gravité et par une atmosphère très peu dense et sec. Les caractéristiques de ses formations lithologiques indiquent très clairement que les dépôts les plus anciens de ses sédiments, se sont probablement formés dans un milieu aqueux de faible profondeur et ayant persisté sur différents intervalle de temps. Ce type de dépôt remonte à l'époque située juste après la formation du cratère « Gale », soit tout juste après l'ère de la formation des phillosilicates argileux. La formation d'un lac peu profond et peu tourmenté a permis la formation d'un plancher lisse, composé presque essentiellement de pavée d'affleurement de grès aux grains fin plus résistant à l'érosion avec un peu d'argile, ce qui correspondant à la couche de fond « Sheepbed » composé de mudstone.

[11] Geologic overview of the Mars Science Laboratory rover mission at the Kimberley, Gale crater : 22 December 2016

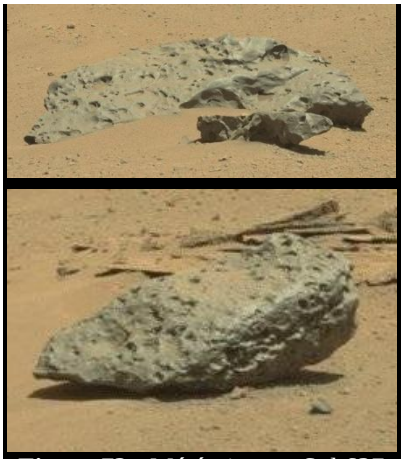


Figure 72 : Météorites au Sol 637 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

La stratification fine des affleurements rocheux indique également que le dépôt des sédiments s'est effectué sous un faible courant durant une assez longue période de temps, dont l'épaisseur des lamelles de chaque strates retrace une certaine période climatique ou un évènement géologique particulier ayant survenu sur la planète. Plus tard, lors d'avènement qui sont associé aux grandes périodes de débâcles inondables, causé par exemple par la fonte des glaciers se trouvant au sommet du mont « Sharp », ou par la remonter de nappe phréatique en période plus chaude ou lors de la collision de météorites à proximité. Des zones d'écoulement fluvial et torrentiel se sont mises à dévaler les pentes en dessinant le contour des vallées et des buttes qui caractérise si bien le flanc nord-ouest du mont « Sharp ». Le torrent est venu ensuite inonder la pleine situé en contre bas en érodant et en creusant le sol sur sont passage. L'érosion des parties moins résistantes (empilement de sédiment éolien) situées juste sous le couvercle du plancher du lac par la circulation d'une grande quantité d'eau, a creusé les vallées et a favorisée les zones d'éboulis par l'effondrement des parties plus résistantes (sédiment lacustre située au sommet des buttes) en formant les différentes zones d'escarpements rocheux qui entoure la base des buttes. Plusieurs lignes de flottaisons semblent indiquer que ce phénomène s'est reproduit à plusieurs autres reprises, mettant en relation des périodes sèche (dépôts sédimentaire éolien de la formation Stimson) et humide (dépôts sédimentaire lacustre) correspondant à la couche géologique intermédiaire de « Gillespie ». Certaines des roches éparpillées sur le sol, sur les pentes et le sommet des petites vallées, proviennent d'une couche d'éjectas plus récente qui a été créé lors de la formation des petits cratères qui se trouvent aux alentours, et que l'érosion a dégagée par la suite en favorisant des petites zones d'éboulis le long des pentes des vallées. Les roches aux formes arrondis ont subis l'action érosive de l'eau, tandis que les autres aux arrêtes plus aigus sont plus récentes. Mais comme il fallait s'y attendre, Curiosity a photographié ses premières météorites au Sol 637 que l'on peut voir vers le centre du panorama de la figure 71, et qui ont été baptisées « Lebanon » et « Littleton » pour la plus grande des deux qui fait environ deux mètres de large (Figure 72). Il s'agit de plusieurs fragments d'une même météorite ferreuse que l'on retrouve à moitiés enfouis

Figure 73 : Sol 644, après avoir parcourus 225,67 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Figure 74 : Sol 647, après un parcours de 29,69 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

dans le sol, et qui a éclaté en plusieurs morceaux peu de temps avant de toucher le sol martien à une époque ou l'atmosphère de Mars devait être beaucoup plus dense.

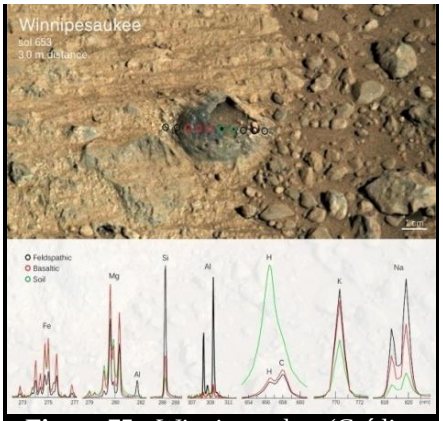


Figure 75 : Winnipesaukee (Crédit : NASA/JPL-Caltech/LANL/CNES)

Une semaine plus tard sur le Sol 644 le 29 mai, Curiosity roule sur une distance de 100,66 mètres sur la planète Mars (Figure 73), soit la cinquième séquence de roulement quotidien supérieur au 100 mètres, avec une température journalière d'environ -20 °C le jour à plus de -80 °C la nuit. Un nouveau panorama couleur est entamé au Sol 647 à l'aide de la MastCam de gauche de 34 mm fixée au sommet du mât (Figure 74). Trois jours plus tard le 5 juin, l'astromobile réussi pour la première fois à observer le transite à peine visible de la planète Mercure devant le disque solaire. Il s'agit de la toute première observation de ce genre à être mené par un engin spatial se trouvant à la surface d'une autre planète que la Terre. Au Sol 654 le 8 juin, le laser LIBS de ChemCam est utilisé pour examiner une cible en forme de coquille cassée dénommée « Winnipesaukee » (Figure 75). La cible de trois centimètre de diamètre est intégrée dans une roche mère au grain fin, situé à environ 3 mètres de distance du rover. Le laser à effectuer un alignement de dix trous de trente tirs chacun, faisant ainsi ressortir la composition chimique de trois types de matériaux distincts. Soit le socle situé de chaque côtés de la roche mère (cercle noir) riche en oxyde de silicium, d'aluminium et de sodium (feldspath), la surface de la coquille (cercle rouge) qui est plutôt de composition basaltique riche en fer et magnésium (matériau mafique), et la poussière (cercle vert) se trouvant dans le creux à l'intérieur de la coquille qui est plus riche en hydrogène. Les nouvelles planifications d'entrainement et de roulement sur la planète rouge, qui exploite l'imagerie à longue distance pour économiser l'usure des roues, permet désormais de franchir des distances quotidienne beaucoup plus grande. La nouvelle stratégie d'entrainement consistent à faire régulièrement des petites pauses durant le trajet, le temps de prendre des photos numériques du terrain avec les caméras stéréoscopiques de navigation (HazCam et NavCam), qui sont par la suite converties en carte virtuelle 3D qui fait ressortir les détails du relief pour être ensuite analysée et interprété par les différentes procédures de l'intelligence artificiel de l'ordinateur de

Figure 76 : Sol 659, après avoir parcourus 332,55 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 77 : Sol 663, après avoir parcourus 289,79 mètres en 3 séances de conduites (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

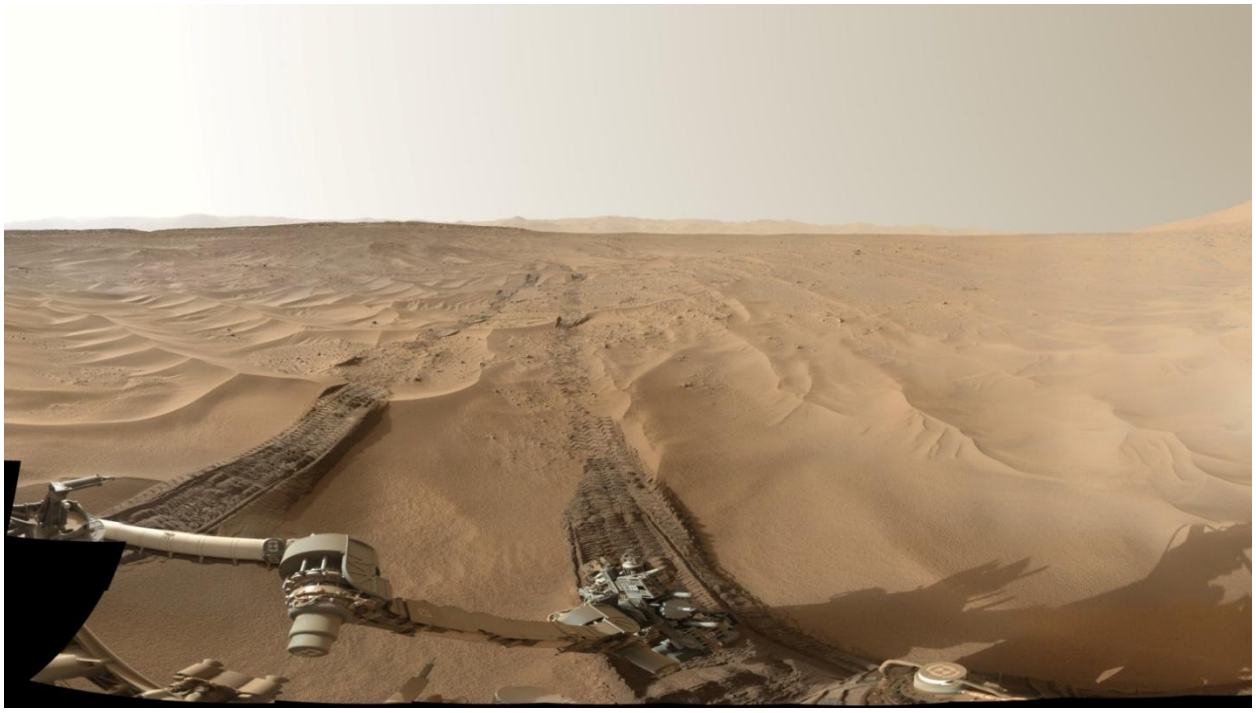


Figure 79 : Sol 673, après avoir parcourus 298,25 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

Figure 78 : Sol 669, après avoir parcourus 339,41 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

bord afin d'identifier automatiquement les dangers. Ce qui permet au robot d'aller plus loin en toute sécurité, car la planification séquentielle axée sur des petits déplacements va ajuster automatiquement la trajectoire du rover sur le terrain, et selon les difficultés et les obstacles qui seront rencontrés avant chaque déplacement. L'astromobile franchis dès le lendemain le 10 juin 2014 (Sol 655) le cap de son septième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars.

Le rover franchis pour une sixième fois le cap des cents mètres parcourus en une seule journée à la surface de la planète Mars, en parcourant sa troisième distance la plus longue depuis le début de la mission avec 117,28 mètres au Sol 657 à une vitesse moyenne de 4 cm par seconde. Un nouveau panorama couleur de 360° est entamé au Sol 659 avec la MastCam de gauche de 34 mm (Figure 76), sur lequel on peut voir le magnifique paysage martien traversé par le robot le long de son trajet sur Mars. Aux Sols 661 et 662 le 16 et 17 juin, le robot franchis une distance de 264,99 mètres, il s'agit de la septième (135,24 mètres au Sol 661) et huitième (129,75 mètres au Sol 662) séance de roulement quotidienne qui est supérieur aux cents mètres. En plus des mesures journalières effectuées avec les instruments REMS, RAD et NAD, le rover entame un nouveau panorama couleur de 360° avec la MastCam de gauche de 34 mm au Sol 663 (Figure 77). La neuvième séance de roulement quotidienne supérieur aux 100 mètres, venant également au deuxième rang juste après le record du Sol 385, est exécutée le 20 juin 2014 (Sol 665) avec

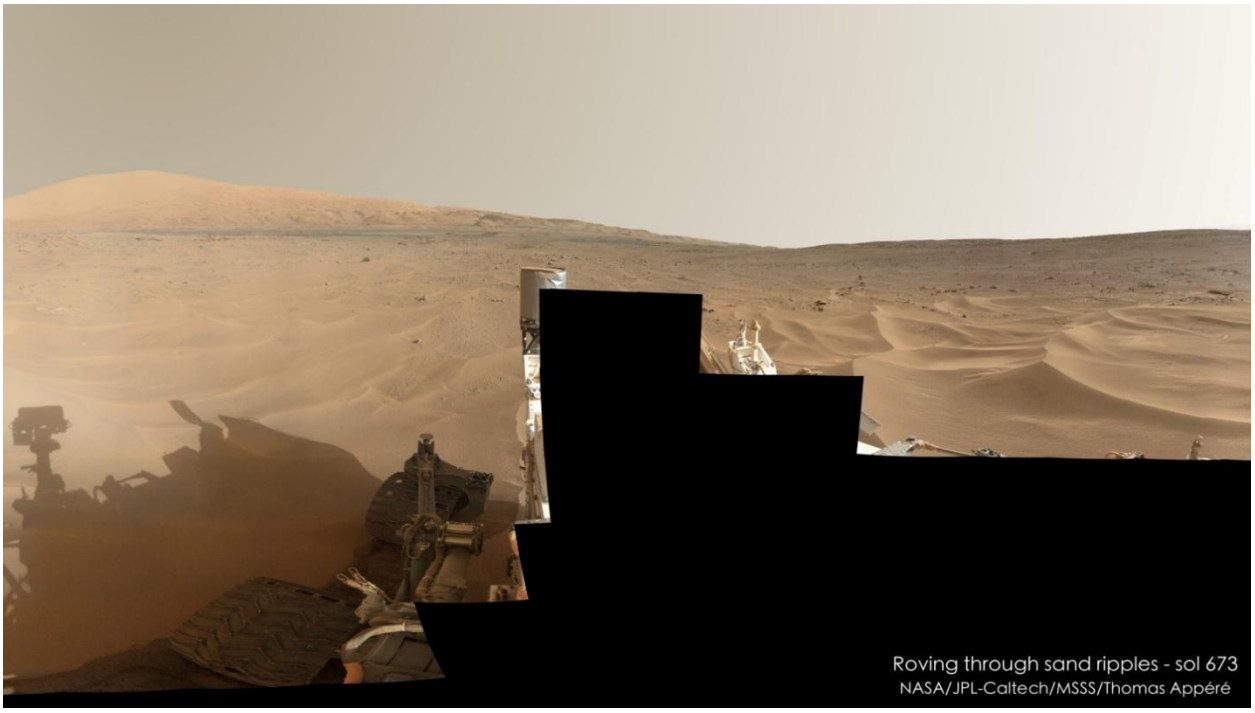


Figure 79 : Suite Sol 673 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

une distance parcourus de 135,86 mètres. L'astromobile parcourt 98,11 mètres au Sol 668, et dépasse de 55,95 mètres la distance totale parcourus par le rover Spirit lors de sa mission à la surface de la planète Mars, avec au compteur plus de 7 786,45 mètres franchie en l'espace d'un peu moins de deux ans, contre 7 730.5 mètres pour le rover Spirit parcourus en six ans et 77 jours. Au Sol 669 le 24 juin, après avoir fait un nouveau panorama des lieux avec ses caméras de navigations NavCam (Figure 78) à la hauteur de « Lolt's Ledge », le robot fête son premier anniversaire martien de 687 jours terrestre, dépassant ainsi la période nominale qui avait été initialement attribuée pour la durée de la mission du rover sur Mars[12]. La dixième et onzième séance de roulement quotidienne supérieur aux cents mètres sont exécutés le 25 et 26 juin 2014, avec respectivement 110,52 mètres (Sol 670) avec le franchissement du huitième kilomètre et de 114,79 mètres (Sol 671). Au totale pour le mois de juin 2014, l'astromobile aura parcourus une distance cumulative de 743,44 mètres effectué en seulement six séances de roulement quotidien.

Figure 80 : Nova
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Un dispositif de sécurité interrompt quelque peu le déplacement de l'astromobile au Sol 672 le 27 juin, lorsque que ce dernier a rencontré un petit glissement de ses roues en cherchant à traverser un petit champ de dune au site dénommé « Radcliff » (Figure 79). Après l'étude des traces de roues laissées sur le sol martien, le rover fait marche arrière sur une courte distance pour contourner le champ de dune au Sol 674, puis reprend sa route vers le sud-est en direction de « Zabriskie Plateau » et parcours 222,26 mètres en 6 séances de conduite avant de s'arrêter devant la roche « Nova » (Sols 685-687). Au Sol 687 le 13 juillet, l'imageur

[12] A Look Back: The Drilling Campaign of the Curiosity Rover during the Mars Science Laboratory's Prime Mission, Icarus Volume 319, 15 February 2019

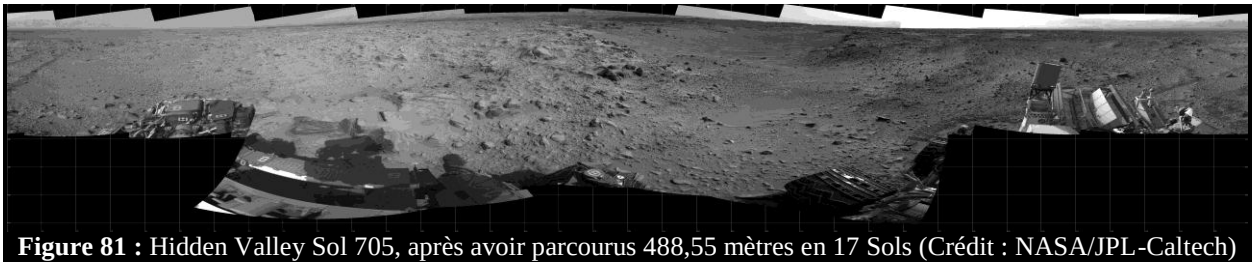


Figure 81 : Hidden Valley Sol 705, après avoir parcourus 488,55 mètres en 17 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

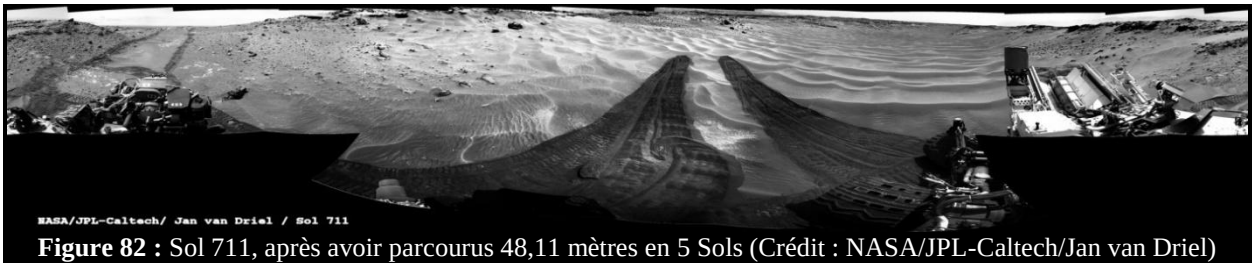


Figure 82 : Sol 711, après avoir parcourus 48,11 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

microscopique de haute résolution MAHLI réussit à capturées en image l'étincelle du panache de plasma et les mouvements turbulents du nuage de gaz et de poussières, qui ont été généré lors d'une série de plus de cent tirs du faisceau laser LIBS de ChemCam sur une cible se trouvant sur la roche « Nova » (Figure 80). La faible pression atmosphérique qui existe sur Mars, fait en sorte que l'étincèle et le nuage de plasma sont plus grand et plus lumineux que sur terre. Les analyses effectuées par le spectromètre de ChemCam ont révélées la présence de silicium et de sodium, avec une concentration croissante d'aluminium en fonction de la profondeur.

Figure 83 : Le reste de Windjana (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

L'astromobile reprend la route dès le lendemain au Sol 688 en longeant le flanc ouest de « Zabriskie Plateau ». Il s'agit d'un terrain accidenté et rocailleux très difficile parsemés de roches stratifiées aux arrêtes aigus et pointues qui affleurent à la surface, et qui ont été érodées sur une longue période de temps par les vents martien charger de sables et de fines poussières abrasif. Une semaine plus tard après avoir parcouru 213,05 mètres avec prudence pour économiser l'usure des roues, le rover éprouve une anomalie avec son ordinateur de secours (B) qui l'immobilise durant cinq jours entre les Sols 696 et 701 du 22 au 27 juillet 2014. Le temps de résoudre le problème sur l'ordinateur de secours, l'astromobile est restreint a faire des activités standards de surveillance de l'environnement. Deux jours plus tard sur le Sol 703, Curiosity rejoint finalement la petite dépression peu profonde « Hidden Valley » de 150 mètres de long sur 45 mètres de largeur (Figure 81), dont le plancher est parsemé de petites ondulations de dunes de sable. Après avoir vidangé et étudier les restes de l'échantillonnage conservé de « Windjana » au Sol 704 (Figure 83), qui a été recueillis lors de la troisième campagne de forage effectué à « Kimberley ». Le rover amorce doucement la descende de la petite pente situé à l'entrée de « Hidden Valley » au Sol 706, toute en effectuant l'étude de la consistance et de la texture du terrain. Le robot rencontre un terrain plus glissant et plus sablonneux que prévue au Sol 709 le 4 août 2014. Ce qui obligent les contrôleurs du robot de planifier un nouvel itinéraire de conduite, tout en ordonnant au rover de faire marche arrière et de rebrousser chemin au Sol 710. Le lendemain au Sol 711 (Figure 82) le 6 août 2014, Curiosity fête son deuxième anniversaire terrestre à explorer la surface de la planète Mars.

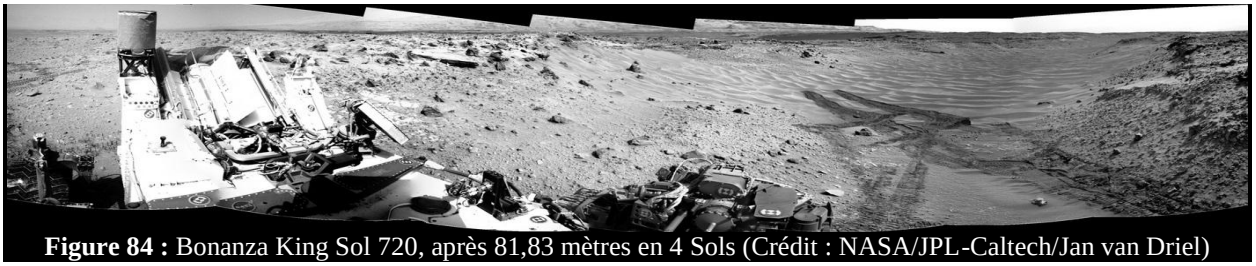


Figure 84 : Bonanza King Sol 720, après 81,83 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

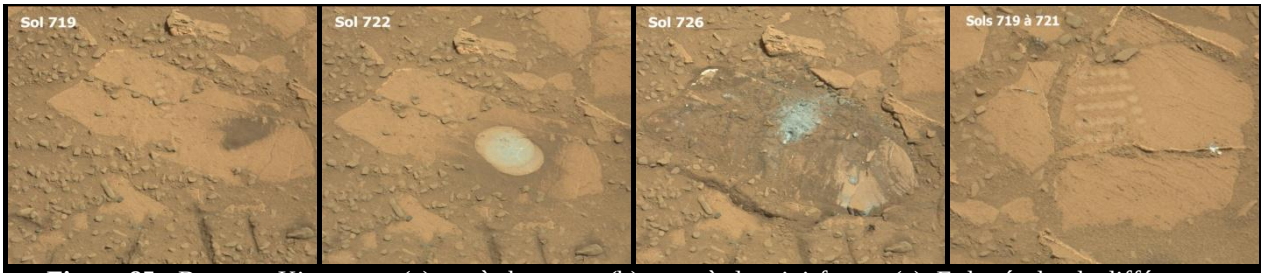


Figure 85 : Bonanza King avant (a), après brossage (b) et après le mini-forage (c). Et le résulta de différentes séances de tirs laser effectuée sur une autre cible entre les Sols 719 et 721 (d) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Après avoir photographié une nouvelle fois le passage de Phobos devant le soleil, l'astromobile reprend la route et remonte la pente vers la sortie de « Hidden Valley » au Sol 713. Dans le but d'aller étudier une zone potentielle et non planifié de forage situé à l'entrer de « Hidden Valley ». Le rover rejoint le site ou se trouve la roche plate « Bonanza King » (Sols 717-728) (Figure 84 et 85) qui a une surface parcouru d'une série de petites veines claire, et qui se trouve dans un champ de roches écrasée entourée de résidus de poudre blanche qui se sont brisées sous le poids des roues de l'astromobile au Sol 705 (Figure 81) et 714. Les analyses de l'APXS démontrent qu'il s'agit d'une roche sédimentaire riche en silicium, tout comme « Wildrose » rencontré au Sol 695 et de « Fuzzy Smith » rencontré à « Home Plate » par Spirit en 2006 au Sol 771 de sa mission. Le robot effectue deux séances de tirs avec le laser LIBS de ChemCam au Sol 719, composé chacun d'un groupement de cinq tirs de laser, soit un alignement sur la roche « Bonanza King » (Figure 85:a) et un autre sur une cible de roche qui se trouve un peu plus haut. Deux jours plus tard sur le Sol 721, Curiosity effectue une vaste campagne de tirs

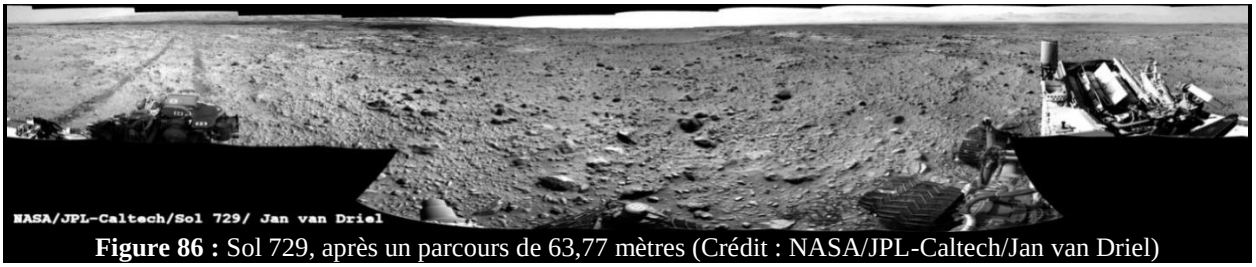


Figure 86 : Sol 729, après un parcours de 63,77 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 87 : Sol 739, après un trajet de 174,34 m en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/James Sorenson)

Planche 12 : Pahrump Hills Sol 752 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Doug Ellison)

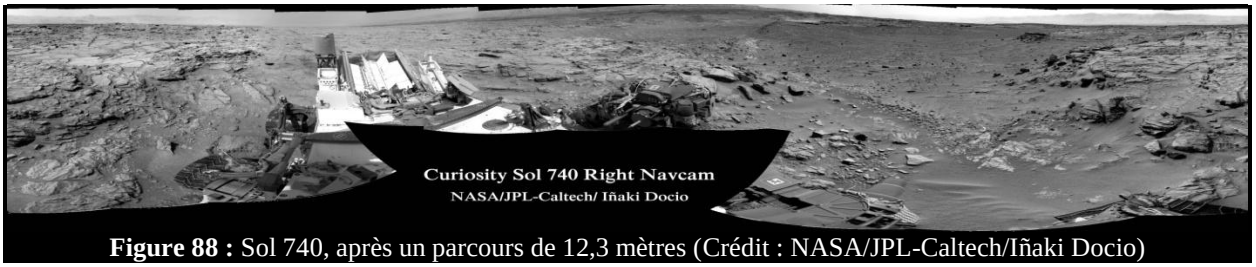


Figure 88 : Sol 740, après un parcours de 12,3 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Iñaki Docio)

Figure 89 : Sol 743, après un parcours de 89,77 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Iñaki Docio)

Figure 90 : Sol 746, après avoir parcourus 42,79 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel**)**

Figure 91 : Sol 747, après avoir parcourus 90,14 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel**)**

Planche 12 : Suite de Pahrump Hills Sol 752 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Doug Ellison)

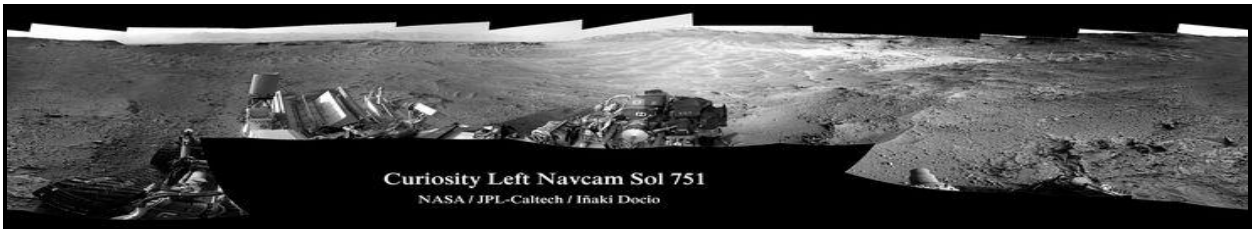
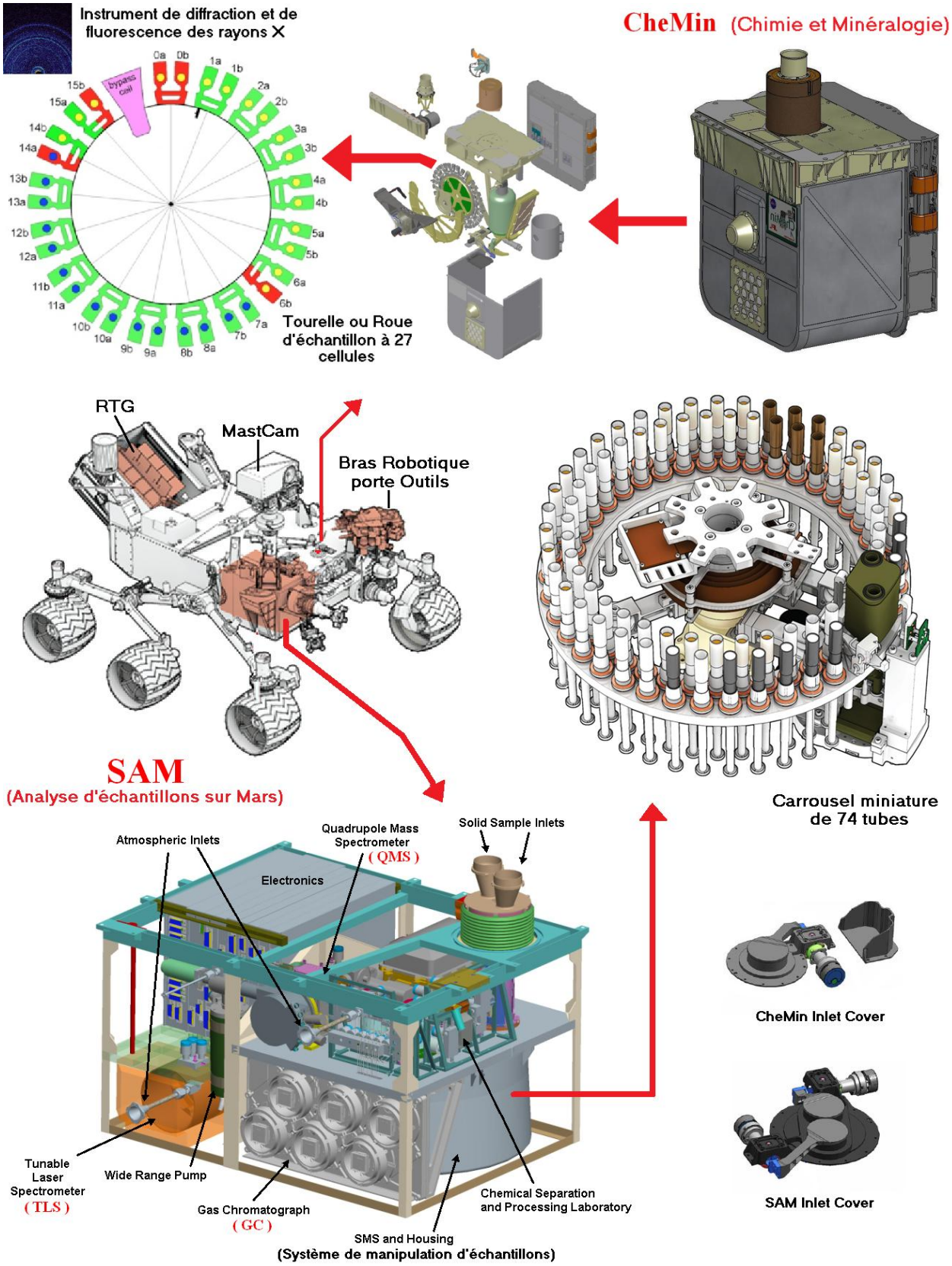


Figure 92 : Sol 751, après avoir parcourus 134,64 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Iñaki Docio**)**

laser en dessinant sur une roche un groupement de cinq lignes verticale composée de cinq troues chacun (Figure 85:d). Après avoir brossé la surface de la roche « Bonanza King » au Sol 722 (Figure 85:b), une procédure de mini-forage est entamée au Sol 724 pour évaluer la dureté de la cible, mais sous l'action de la percussion de la perceuse au Sol 726 la roche s'est légèrement déplacée (Figure 85:c). L'instabilité de la cible ayant été détectée par le logiciel de protection du rover, ce dernier a fait avorter la procédure de mini-forage. Après une série d'analyse pour évaluer la situation, la décision fut prise au Sol 726 de rechercher un meilleur emplacement pour effectuer le quatrième forage de la mission. Le rover Curiosity quitte définitivement « Hidden Valley » et reprend la route au Sol 729 en direction de « Amargosa Valley », qui se trouve 200 mètres plus loin vers l'ouest (Figure 86). L'astromobile traverse ensuite le cratère « Trilobite » d'environ 60 mètres de diamètre au Sol 733, puis arrive à l'entrer de « Amargosa Valley » une semaine plus tard sur le Sol 740 le 5 septembre 2014 (Figure 87-88). Durant le parcourt, Curiosity franchis le cap de son neuvième kilomètre parcourus à la surface de la planète rouge le 31 août 2014 (Sol 735). À partir de là (Figure 89 à 92), le rover va longer la bordure intérieur nord de la crête « Owens Valley » jusqu'au Sol 746 à la hauteur du petit canyon « Jubilee Pass » (Figure 90), avant de tourner vers le sud en direction de « Pahrump Hills » (Figure 91-92 et Planche 12) en serpentant à travers un réseau de petites vallées peu profondes entourées de buttes et d'ondulation de dune de sable très fin.


Instrument de diffraction et de fluorescence des rayons X
CheMin (Chimie et Minéralogie)
0a 0b 1a 1b 2a 2b 3a 3b 4a 4b 5a 5b 6a 6b 7a 7b 8a 8b 9a 9b 10a 10b 11a 11b 12a 12b 13a 13b 14a 14b 15a 15b
bypass cell
Tourelle ou Roue d'échantillon à 27 cellules
RTG
MastCam
Bras Robotique porte Outils
SAM
(Analyse d'échantillons sur Mars)
Carrousel miniature de 74 tubes
Atmospheric Inlets
Quadrupole Mass Spectrometer
(QMS)
Solid Sample Inlets
Electronics
Tunable Laser Spectrometer
(TLS)
Wide Range Pump
Gas Chromatograph
(GC)
Chemical Separation and Processing Laboratory
SMS and Housing
(Système de manipulation d'échantillons)
CheMin Inlet Cover
SAM Inlet Cover

PAHRUMP HILLS
(Sol 753 à 923)

Après avoir parcourus 112,04 mètres au Sol 751, soit la douzième séance de roulement quotidien supérieur au cent mètres. Le rover Curiosity arrive finalement dans les environs de « Pahrump Hills » au Sol 753 le 18 septembre après avoir franchis 22,31 mètres (Planche 12-13 et Figure 93). Il s'agit d'une formation d'affleurement rocheux visible depuis l'espace faisant partie de la couche de fond de la formation Murray située juste à la base du mont « Sharp », composée d'un empilement stratifiée de roches aux teintes claires qui témoignent de différentes phases de sédimentation, les plus anciennes rencontrées jusqu'ici sur la planète Mars par une mission d'exploration de surface. Le Sol 756 le 21 septembre 2014 est marqué par l'arrivé de la sonde américaine MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission), suivit trois jours plus tard par la mise en orbite de la sonde Indienne MOM (Mars Orbiter Mission) au Sol 759.

Figure 93 : Sol 753-58, après un avoir parcourus 22,31 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 94 : Sol 782, après un parcours de 22,42 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Iñaki Docio)

Figure 95 : Zone de forage et Confidence Hills (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

La campagne du quatrième forage de la mission est exécutée le lendemain au Sol 759 le 25 septembre (Figure 95), sur une cible ayant pour nom « Confidence Hills » (Sols 753-779) avec un trou de 1,6 centimètre de diamètre sur environ 6,7 centimètre de profondeur. On peut voir le pavé d'affleurement ou sera effectué la campagne de forage à « Confidence Hills » vers le centre de la figure 93, il s'agit du deuxième pavée d'affleurement situé vers l'extrémité de la dune en forme de pointe à droite de la tourelle porte outil du rover. La campagne de forage incluait une séance de brossage de la cible qui a eu lieu au

Figure 96 : Phobos au Sol 784 (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Sol 755, pour enlever la poussière rouge qui la recouvre, et du mini-forage de test qui a été creusé juste en dessous du forage principal au Sol 756 sur 2 cm de profondeur. La phase primaire et initiale de la mission de Curiosity étant terminée, la prolongation de sa mission sur Mars est votée le 1er octobre au Sol 765, soit six jours après que CheMin et SAM est reçu une portion tamisée et traitée de l'échantillon du forage. CheMin va faire quatre analyses de nuit (Sols 771, 776, 778 et 785) avec le matériel d'échantillonnages de « Confidence Hills » (riche en pyroxène, en phyllosilicates et en hématite, avec des quantités mineures de magnétite, d'apatite et de jarosite), et l'échantillon de SAM sera analysé une semaine plus tard sur le Sol 773. Le rover va étudier et analyser les environs du site d'échantillonnage et les résidus du forage durant quatre semaines, avant de se diriger vers l'affleurement « Pink Cliffs » au Sol 782. Curiosity se prépare ensuite à observer le passage de la comète « Siding Spring » dans la nuit du 19 octobre 2014 (Sol 783). Et après avoir photographié la lune Phobos dans le ciel de Mars, tout juste après le coucher de soleil au Sol 784 (Figure 96) avec le téléobjectif de 100 mm de la MastCam de droite. L'astromobile amorce une campagne éclaire autour de « Pahrump Hills » entre les Sols 782 et 796 (Figure 97 et 98), dont l'objectif est de faire la reconnaissance du terrain avec acquisition de données scientifiques à distance en faisant un grand cercle dans le sens des aiguilles d'une montre (Planche 13). L'exploration passe en revue les sites de « Book Cliffs » (Sols 785-86), de « Skyline » (Sols 787-89), de « Alexander Hills » (Sols 790-91) que l'on peut voir au centre de la figure 97, de « Chinle » (Sols 792-93) et de « Whale Rock » (Sols 794-96). Le trajet est documenté par des images du sol prises sous le rover par la caméra Mardi (Mar Descent Imager), puis après avoir parcourus une distance de 129,47 mètres le robot revient sur ses pas pour rejoindre le lieu de son point de départ et du quatrième forage.

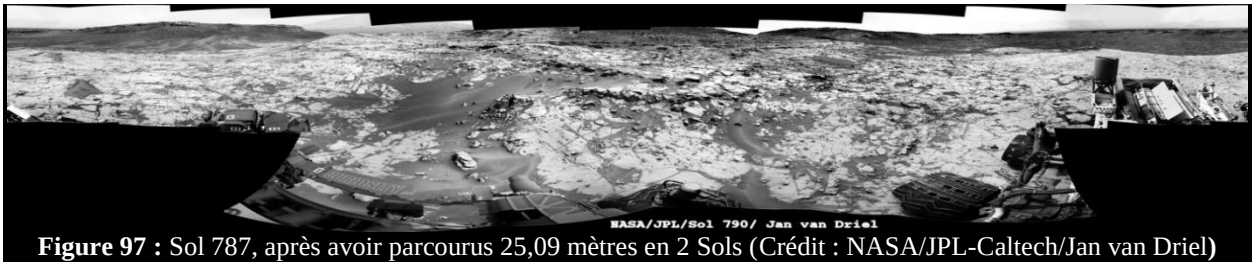


Figure 97 : Sol 787, après avoir parcourus 25,09 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

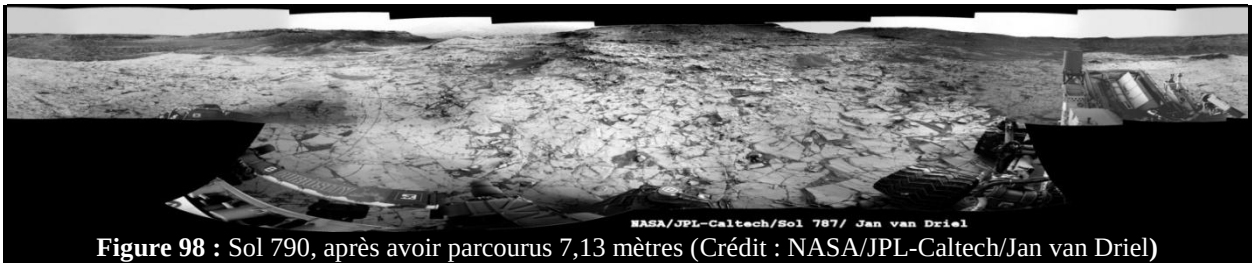


Figure 98 : Sol 790, après avoir parcourus 7,13 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

La diversité de la texture des roches et des pavées d'affleurement, ainsi que leurs différents degrés de stratifications sous forme d'empilement de fine couche à grains fins fortement érodé, a convaincu les chercheurs de la NASA d'effectuer une nouvelle passe dans l'objectif d'effectuer une véritable campagne d'étude et d'analyse de cette région (Figure 100 à 104), afin de mieux comprendre les différents processus géologiques qui ont transformés les

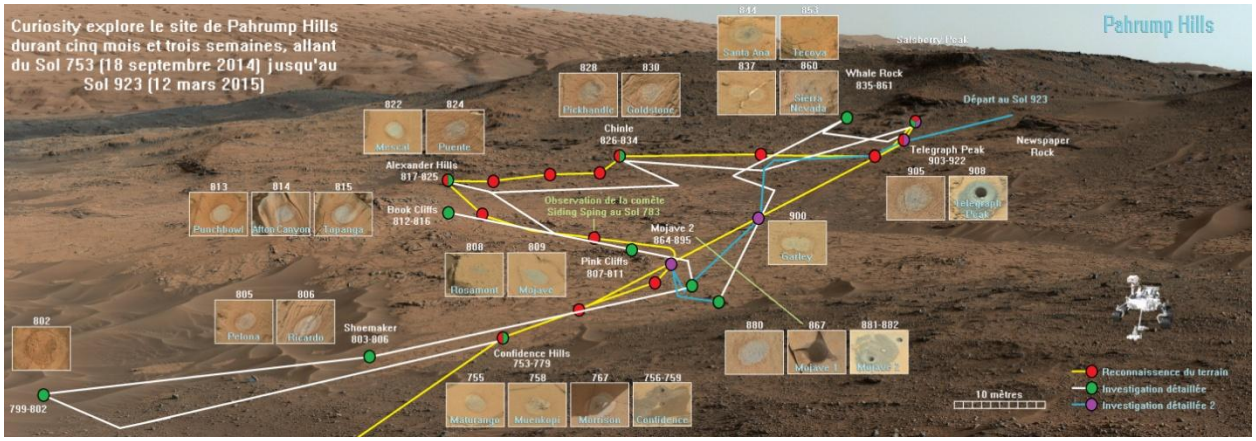


Planche 13 : Activité de DRT et de forage au site de Pahrump Hills entre les Sols 753 et 923 (Carte, position et trajet du rover guidées par les cartes de la Nasa et de Phil Stooke)

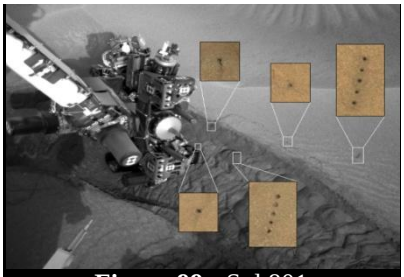


Figure 99 : Sol 801 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

sédiments en roche sédimentaire (diagenèse) et de leur érosion par la suite. L'astromobile revient sur ses pas en se dirigeant de nouveau vers la région nord de « Pahrump Hills » au Sol 797, et parcours une longue distance de 52,72 mètres avant de rejoindre une nouvelle zone de travail situé au nord de « Confidence Hills », l'objectif est d'amorcer une seconde campagne éclaire (Sols 798-861). Le premier test de relais de communication radio entre Curiosity et l'orbiteur MAVEN est effectué sur le Sol 800 le 6 novembre 2014, lors d'un transfère réussi de 550 mégabits de données vers la terre. Le rover entame sa vaste campagne d'investigation géologique et scientifique de « Pahrump Hills » (Planche 13), par l'exploration plus détaillée du site se trouvant au nord qui contient les cibles « Kelso », « Dumont » et « Garlok » entre les Sols 799 et 802. Avec en prime une vaste campagne de tirs du laser LIBS de ChemCam sur des cibles se trouvant a proximité de l'une des traces de roue du rover, qui a été utilisé comme outil pour creuser une tranchée à travers une petite dune, dans l'objectif d'étudier les caractéristiques physiques et chimiques des grains de sables qui se trouvent exposer dans la partie transversale (Figure 99). Le petit laser d'autofocus à onde continue de l'instrument ChemCam est tombé hors d'usage au Sol 801, causé par la faiblesse d'une minuscule diode utilisée dans le mode autofocus. Le laser servait à faire la mise au point du télescope de l'instrument avant le déclenchement du laser plus puissant de ChemCam (LIBS). Le focus du télescope sera désormais effectué avant chaque tir, par différents réglages de puissance du laser principal LIBS couplé avec des analyses de prises de vue du micro-imageur RMI de l'instrument ChemCam.

Le rover se déplace ensuite sur une courte distance de 10,14 mètres vers le sud-ouest pour revisité le site dénommé « Shoemaker » entre les Sols 803 et 806 (Figure 100), avec en prime le brossage des cibles « Pelona » (Sol 805) et « Ricardo » (Sol 806) situés sur un ensemble de dalle de pierres claire aux grains fin. Dès que la surface de la roche est nettoyée, le micro imageur MAHLI est déployé pour prendre des images de haute résolution de la cible afin d'étudier la structure sédimentaire ainsi que la taille des grains exposées. Puis, viens ensuite les longues séances d'intégration du spectromètre APXS, dont l'analyse permet d'évaluer la composition chimique des roches. Après un court déplacement de 16,72 mètres vers le sud-ouest, c'est le tour de la petite crête « Pink Cliffs » d'environ dix mètres de long à recevoir la visite de Curiosity

Planche 14 : Salsberry Peak au Sol 855 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora)

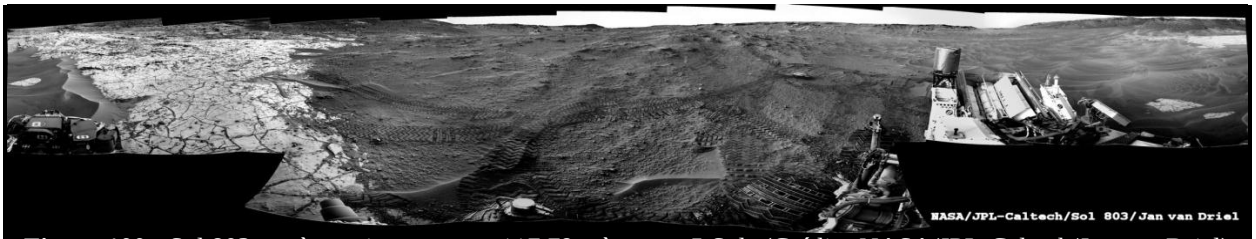


Figure 100 : Sol 803, après avoir parcourus 117,79 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

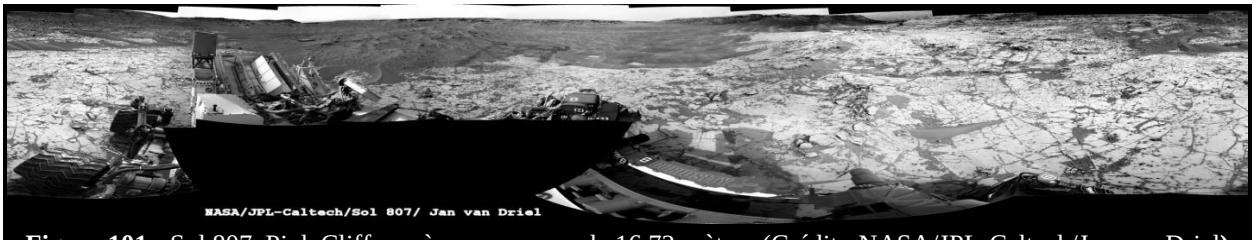


Figure 101 : Sol 807, Pink Cliffs après un parcours de 16,72 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

entre les Sols 807 et 811 (Figure 101), incluant le brossage des cibles « Rosamont » (Sol 808) et « Mojave » (Sol 809). Les images du micro imageur MAHLI de « Mojave » ont révélés la présence de cristaux lenticulaire qui ressemble à des cristaux de sel incrustés dans la matrice de la roche. Le Sol 807 le 13 novembre 2014, a également été marqué par l'événement de l'atterrissage du module Philae de la mission spatiale Rosetta sur la comète 67P Churyumov-Gerasimenko.

Viens ensuite l'exploration plus détaillée du site de l'affleurement « Book Cliffs », qui se trouve à 12,09 mètres vers le nord-ouest entre les Sols 812 et 816 (Figure 102), ou plusieurs

Planche 14 : Suite de Salsberry Peak au Sol 855 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora)

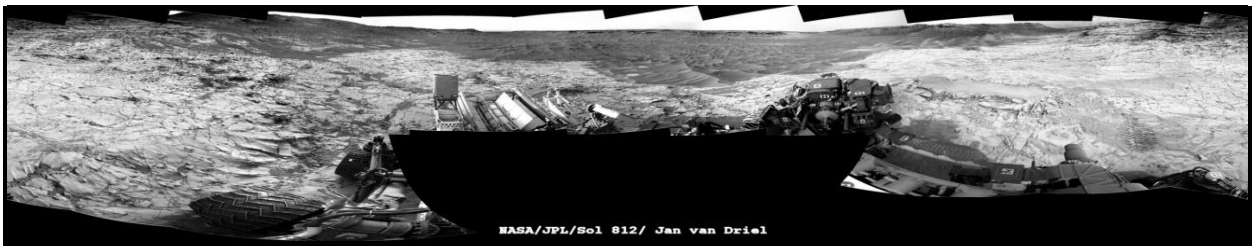


Figure 102 : Sol 812, Book Cliffs, après un trajet de 12,09 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 103 : Sol 831, Chinle après un trajet de 61,32 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 104 : Sol 837, Whale Rock après 35,8 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 105 : Sol 838 près de Whale Rock (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora)

séances de brossages ont eu lieu sur des cibles de roches se trouvant dans la partie basse (« Punchbowl » au Sol 813), moyenne (« Afton Canyon » au Sol 814) et supérieur (« Topanga » au Sol 815) de l'affleurement rocheux. L'affleurement rocheux « Book Cliffs » est visible au centre de la partie droite de la figure 102. Le robot revient quelque peu sur ses pas, puis se déplace de 35,27 mètres vers le nord-ouest en direction de « Alexander Hills » entre les Sols 817 et 825. L'astromobile utilise de nouveau son outil de nettoyage DRT pour enlever la poussière à la surface des cibles « Mescal » (Sols 819 et 822) et « Puente » (Sol 824), afin d'exposé une surface plus fraîche pour l'utilisation des autres instruments scientifiques du rover. Curiosity se dirige ensuite vers le nord-est en parcourant une distance de 26,05 mètres pour rejoindre l'affleurement « Chinle » entre les Sols 826 et 834 (Figure 103), et de brosser les cibles « Pickhandle » qui se trouve dans la partie supérieur au Sol 828, et « Goldstone » au Sol 830 qui se trouve dans la partie inférieur de l'affleurement. Puis, vient le tour de la zone de travail de « Whale Rock » qui se trouve à 30,72 mètres plus loin vers le nord-est entre les Sols 835 et 861 (Figure 104 et 105), avec le brossage d'une cible sur un pavé d'affleurement parcourus de filons remplis de substance blanche au Sol 837, suivit une semaine plus tard du brossage de la roche « Santa Ana » au Sol 844. Le robot est ensuite placé en mode automatique pour couvrir une grande partie de la période des fêtes entre les Sols 842 et 858, soit du 19 décembre 2014 au 4 janvier 2015, incluant le brossage de la roche « Tecoya » au Sol 853 et de « Sierra Nevada » une semaine plus tard sur le Sol 860. Il s'agit de roche sédimentaire composée d'empilement de fines lamelles composées de strates éoliennes lithifiées fortement érodée par le vent martien. Ce type de roches étranges situées à la base de « Whale Rock » est visible au centre de la figure 105. La planche 14 qui a été imagé durant cette même période au Sol 855, nous montre la falaise rocheuse « Salsberry Peak » avec ses parois parsemées de vaines minérale et de filons de matériau de teinte très clair.

Ayant terminé sa campagne d'investigation scientifique pour trouver des sites de forage

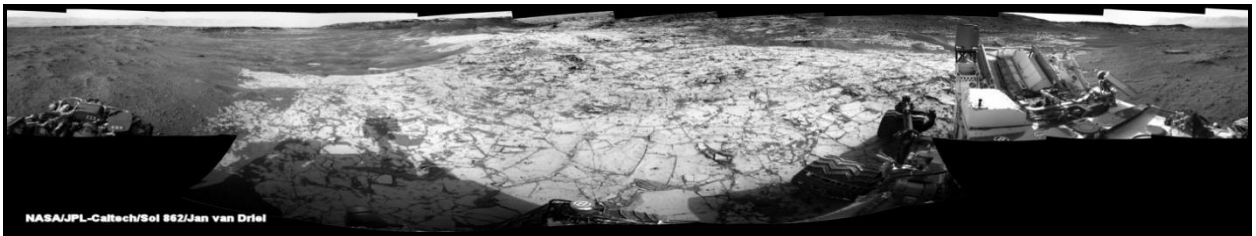


Figure 106 : Sol 862, après un parcours de 69,35 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 107 : Sol 864, après avoir parcourus un trajet de 4,41 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 108 : Zone du cinquième mini-forage de test (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

potentiel. Curiosity reprend la route vers le sud-ouest au Sol 862 en parcourant une distance de 69,35 mètres vers le nord en direction de « Pink Cliffs » (Figure 106). La décision fut prise d'effectuer la cinquième campagne de forage de la mission sur l'un des pavés d'affleurements qui se trouvent à la base de « Pink Cliffs » près de la cible « Mojave », dont la surface brossé au Sol 809 présentait des dépôts de minéraux cristallisés de la taille d'un grain de riz. L'affleurement rocheux « Pink Cliffs » est visible vers le centre de la partie gauche de la figure 107, et vers le centre de la figure 109. Lors de cette troisième visite et juste avant d'effectuer le nouveau forage, l'astromobile en profite pour faire une nouvelle analyse atmosphérique avec l'instrument SAM au Sol 865, et ceci afin de mesurer la concentration de méthane avant de faire l'analyse des résidus de poudres de roche du cinquième forage. Le mini-forage de test est effectué au Sol 867 le 13 janvier 2015 (Figure 108) lors de l'arrivé du deuxième solstice d'été dans l'hémisphère sud de la planète. Mais sous l'effet des vibrations causé par l'action de la percussion rotative de la perceuse, le pavé d'affleurement s'est fracturé et a éclaté en plusieurs fragments, obligeant les contrôleurs du robot à trouver un nouvel endroit plus robuste pour exécuté le forage principal. Le lendemain au Sol 868 le 14 janvier 2015, le rebot effectue un nouvel autoportrait avec le micro imageur MAHLI (Figure 109), et qui sera complété deux semaines plus tard avec des images prises au Sol 882 et 884 pour y inclure les images du forage « Mojave 2 » situé à gauche du porte outil du robot. Les trois jours suivants seront consacrés à l'examen des roches fraîchement fracturées, et de certaines cibles se trouvant à proximités comme « Rainbow Basin ».

Figure 109 : Sol 868, autoportrait effectué au même site que la figure 107 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS**)**

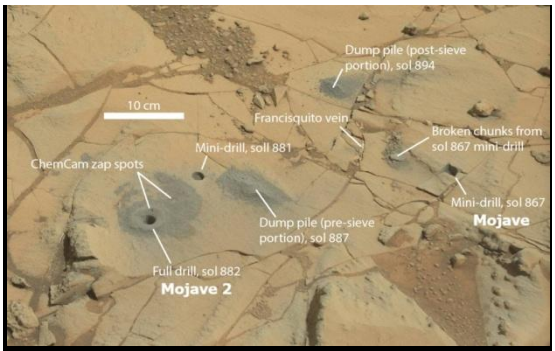


Figure 110 : Zone de forage de Mojave 2 (NASA/JPL-Caltech/MSSS/Emily Lakdawalla)

La quatrième mise à jour des logiciels de bord du système informatique de Curiosity depuis son atterrissage sur la planète Mars est effectuée la semaine suivante entre les Sols 873 et 879. Les mises à jour consistent à améliorer la planification de la conduite autonome du rover sur le terrain, et d'augmenter la capacité d'imagerie virtuelle 3D en utilisant le nouveau logiciel OnSight. Un nouveau site de forage est sélectionné sur la dalle de pierre dénommé « Funk Valley », qui se trouve à environ un mètre à l'est de celle qui c'est fracturée lors du premier essai. Un nouveau test de mini forage est mené avec succès au Sol 881 pour vérifier la

Figure 111 : Sol 898, après un avoir parcourus 17,16 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jan van Driel)

Figure 112 : Sol 903, après un parcours de 33,84 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 113 : Telegraph Peak (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

stabilité et la dureté de la roche, utilisant pour la première fois la nouvelle technique de forage qui contrôle de manière progressive la force de percussion pour éviter de fracturer les roches. Le lendemain au Sol 882 le 29 janvier 2015, le forage principal est effectué 14 cm plus loin sur le site baptisé « Mojave 2 » (Sols 864-95) (Figure 109 et 110). Une partie de l'échantillon de poudre de roche récolté et tamisé par l'instrument Chimra a été livré à CheMin au Sol 884, l'instrument va analyser la minéralogique de l'échantillon durant la nuit, et une autre portion de l'échantillon ont été livrées à SAM pour être analysé sur le Sol 887. L'analyse des gaz émis (EGA) effectué par le spectromètre de masse sur les échantillions de « Confidence Hills » et de « Mojave 2 », a été mesuré en continu pour extraire la composition globale des gaz durant le chauffage sur différents palié de température d'environ 35°C/min jusqu'à environ 860°C. Une partie des gaz émis des mêmes échantillons ont également été analysée par le spectromètre GC-MS pour l'identification moléculaire. L'expérience a confirmée pour la première fois (« Confidence Hills ») la présence de composés thiophéniques (contenant du soufre), comme le thiophène (C_4H_4S), le 2- et 3-méthylthiophènes (C_5H_6S), le méthanthiol (CH_4S) et le diméthylthiophène (C_6H_8S). Ainsi que des hydrocarbures aromatiques comme le benzène (C_6H_6), le toluène (C_7H_8), et des molécules organique soufrée comme le thioéther diméthylsulfure (CH_3SCH_3), et d'autres petites chaînes carbonées[13]. La détection in situ de matière organique dans des mudstones lacustres se trouvant à la base de la formation Murray vieille d'environ 3,5 milliards d'années à « Pahrump Hills », confirme la préservation de la matière organique sur de longue durée contre le rayonnement cosmique dans le cratère « Gale » (~80 millions d'années). Le sulfure de dioxyde de soufre dégagé par l'EGA à partir des schistes boueux indique que le sulfure a été transporté via les eaux souterraines hydrothermales vers le bassin du lac « Gale ». L'astromobile quitte le site de « Mojave 2 » au Sol 896 (Figure 111), et se dirige de nouveau vers le sud-est en direction de « Whale Rock » à la recherche d'un éventuel sixième site de forage.

Une semaine plus tard sur le Sol 903, l'astromobile rejoint un nouveau site de travail

[13] Organic Matter Preserved in 3-Billion-Year-Old Mudstones at Gale Crater, June 8, 2018

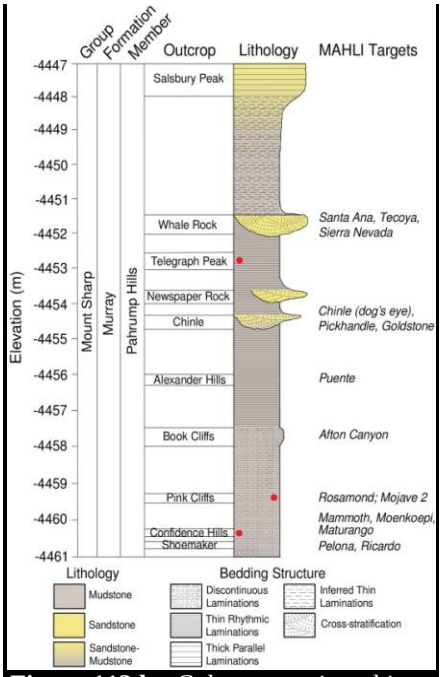


Figure 113 b : Colonne stratigraphique de Pahrump Hills[14]

après avoir rechargé ses batteries et franchit 33,84 mètres en deux Sols. Curiosity entame la sixième campagne de forage de sa mission à la base de « Whale Rock », en utilisant la brosse DRT (Dust Removal Tool) pour nettoyer la surface poussiéreuse sur la cible baptisée « Telegraph Peak » (Sols 903-922) au Sol 905. L'affleurement rocheux « Whale Rock » est visible vers le haut de la partie droite de l'image de la figure 112, suivit plus haut de l'affleurement « Salsberry Peak », et vers le centre de la partie de gauche de l'image nous retrouvons l'affleurement « Newspaper Rock ». Après l'examen de la surface nettoyée effectué durant la nuit par le spectromètre APXS, le laser LIBS est utilisé au Sol 905 pour faire une séance de tir au milieu du trou. La troisième campagne de forage effectué à « Pahrump Hills » a été exécutée au Sol 908 le 25 février 2015. Le trou de 1,6 centimètre diamètre a été creusé avec une profondeur maximale de 5 centimètre. Un court circuit transitoire provenant d'une bobine de fil du mécanisme de percussion qui génère le martèlement à haute fréquence de la foreuse, est survenu au Sol 911 le 27 février 2015 lors du transfert de l'échantillon de poudre de roche récolté à « Telegraph Peak » vers l'instrument CheMin, et qui a immobilisé le rover avec le bras en position vertical durant plus de 10 jours. Le court circuit est survenu au moment ou le rover utilisait le mécanisme de percussion de la foreuse pour faire vibrer la poudre de roche contenu à l'intérieur pour la faire glissée vers la partie de tamisage de l'instrument Chimra[15]. Dès que le problème du court circuit a été mieux compris, les activités du bras de l'astromobile ont pu reprendre normalement au Sol 922 le 11 février 2015 avec le transfère de l'échantillon vers CheMin. La mise en marche de la foreuse en position verticale, a permis à la poudre de roche contenue dans la mèche de descendre vers un tamis avant d'être pris en charge par l'instrument Chimra pour être transféré vers le laboratoire CheMin. Durant la campagne d'exploration des environs de « Pahrump Hills », le rover a parcourus 435,06 mètres en 21 Sols de roulement en cinq mois et trois semaines (170 Sols), exécuté 22 séances de brossage sur des cibles différentes, creusés six troues dont un forage raté (« Mojave 1 »), deux forages de test et trois forages principaux (« Confidence Hills » au Sol 759, « Mojave 2 » au Sol 882 et « Telegraph Peak » au Sol 908). Le micro imageur MAHLI a observées 108 cibles scientifiques dans cette région de Mars. Curiosity quitte définitivement l'emplacement au Sol 923 le 12 mars 2015 en parcourant une courte distance de 11,94 mètres vers le sud-ouest à travers la petite vallée « Artist's Drive » , en direction d'un environnement plus riche en silice.

La région de « Pahrump Hills » marque la première section détaillée de la formation Murray (environnement lacustre composé de dépôt sédimentaire fin à faible énergie) rencontrée par Curiosity, elle contient environ les 14 premiers mètres de strates qui représentent les plus bas reliefs de la formation Murray d'une épaisseur estimée à 400 mètres (Figure 113:b). La couche

[14] Processus de dépôt et diagénétiques des sédiments lacustres martiens tels que révélés à Pahrump Hills par l'imageur Mars Hand Lens, Gale Crater, Mars (18 avril 2023)
[15] Curiosity update, sols 896-949: Telegraph Peak, Garden City, and concern about the drill, The Planetary Society, Emily Lakdawalla, Apr 10, 2015

sédimentaire de la formation Murray recouvre la couche sédimentaire plus ancienne du groupe Bradbury. Le groupe Bradbury (Aeolis Palus**)** témoigne d'un environnement fluvio-deltaïques et lacustre à stratifications entrecroisées allant des mudstones (composé d'argile et de boue) et des sandstone (composé de grès éolien) jusqu'aux conglomérats, qui suggère des épisodes de chenaux fluviaux, de rivières et de plages, ou de la sédimentation de dunes de sable soufflées par le vent appelée stratification croisée avec strates transversales (faisant partie de l'unité stratigraphique de la formation Stimson). L'astromobile quitte les couches plus anciennes du groupe Bradbury et commence à explorer les couches plus récentes qui composent le groupe du Mt. Sharp, dont la base stratigraphique est occupée par la formation Murray qui s'étant sur une élévation moyenne comprise entre 40 et 368 mètres jusqu'à la limite sud de « Vera Rubin Ridge » (VRR) riche en hématite et qui est plus résistante à l'érosion.

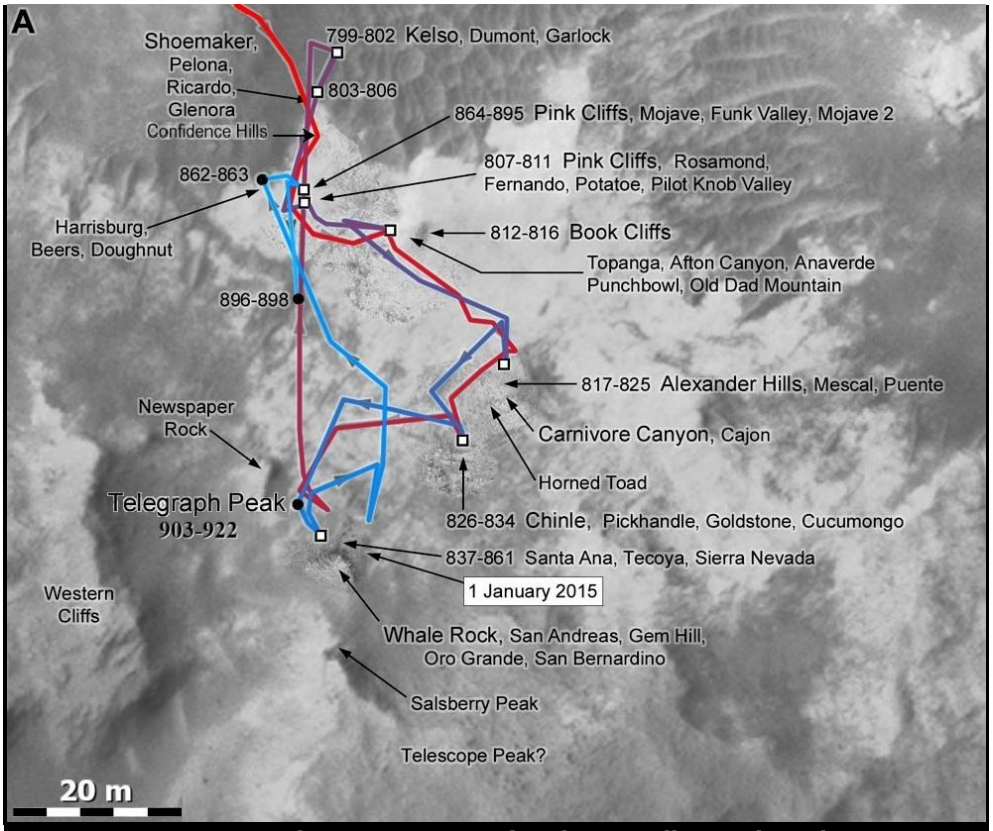


Figure 113 c **:** Parcours de Curiosity autour de Pahrump Hills entre les Sols 753 et 861, effectué entre le 17 septembre 2014 et le 7 janvier 2015 pour une durée de 109 Sols (trois mois et trois semaine). La carte illustre les trois campagnes éclaires (la première en rouge entre les Sols 782-796, la seconde en violet entre les Sols 798-861, et la troisième en bleu claire entre les Sols 863-923). Photo d'arrière plan obtenue grâce aux données fournies par la caméra HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 11 avril 2014. Position et trajet du rover guidée par Phil Stooke.

L’ASCENSION DU MONT SHARP (Sol 924 à 1433)

Figure 114 : Garden City
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Thomas Appéré)

Juste avant le départ définitif de Curiosity de « Pahrump Hills » au Sol 923, l’instrument de chimie analytique miniaturisé CheMin avait déjà reçus une partie de l’échantillon de « Telegraph Peak » (Sol 922) pour faire une analyse de nuit. Une seconde analyse de nuit utilisant une nouvelle portion de l’échantillon contenue dans l’instrument CheMin, est programmée trois jours plus tard au Sol 925 le 14 mars 2015. L’instrument SAM axée sur la recherche de matière organique pouvant être contenue dans l’échantillon de « Telegraph Peak », effectue à son tour une analyse de nuit au Sol 928. Une troisième portion de l’échantillon de forage est utilisée pour effectué une nouvelle séance d’analyse de nuit par l’instrument CheMin au Sol 932, dans le but de pousser la recherche sur l’identification des différents minéraux qui le compose. Le rover Curiosity qui s’apprête à rouler à travers la petite vallée étroite « Artist’s Drive », s’arrête à l’entrée pour observer l’affleurement baptisé « Garden City » durant les deux semaines suivantes entre les Sols 926 et 940 (Figure 114 et 115), incluant une séance de brossage de la cible « Hyrum » au Sol 936 le 26 mars 2015. L’affleurement est constitué d’innombrables veines minérales aux tons claire et foncée avec des crêtes entrecroisées qui jaillissent du sol pouvant atteindre 6 cm de hauteur sur presque 4 cm de large. Ce réseau de veines ressemble beaucoup à une zone de dépôt faisant intervenir l’écoulement d’une certaine quantité d’eau liquide. L’eau chargée de minéraux dissous s’écoulant à travers les fissures de roches fracturées, aurait favorisée la formation de ces zones de dépôts sous formes de veines de matériaux plus résistants que l’érosion aurait par la suite dégagée. Les zones de teintes claire de « Garden City » composée de sulfate de calcium, et les zone de dépôts plus sombres, suggère qu’il aurait existé après la formation du socle rocheux primaire, différentes épisodes d’écoulements de fluide avec précipitation de matériaux différents.

Figure 115 : Sol 944, après avoir parcourus 50,67 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

L’astromobile poursuit l’ascension du mont « Sharp » et rejoint la roche flottante « Kanosh » en parcourant 10,1 mètres à travers la petite vallée « Artist’ s Drive » au Sol 940.

Figure 116 : Sol 950, après un parcours de 61,33 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

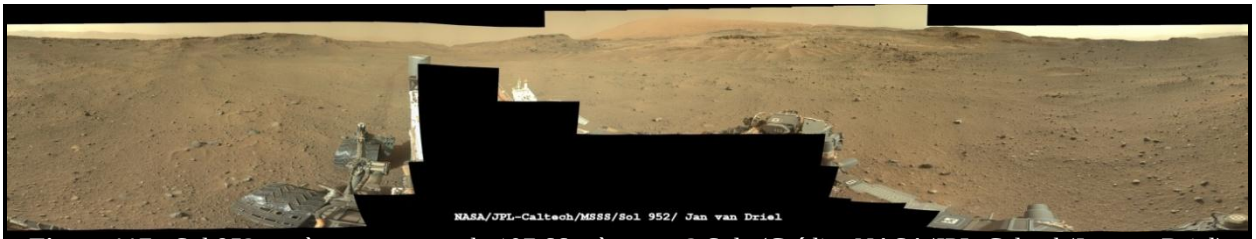


Figure 117 : Sol 952, après un parcours de 107,66 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Après une courte étude de trois Sols de la roche « Kanosh », le robot Curiosity rebrousse chemin pour revenir près de l'affleurement « Garden City » au Sol 944 le 3 avril 2015, que l'on peu voir en bas vers le centre de la figure 115 entre la tourelle porte outil et les traces de roues du rover, afin de faire des études complémentaires de l'affleurement et du terrain jusqu'au Sol 949. Entre temps, l'instrument CheMin effectue la quatrième et la cinquième séance d'analyse de nuit sur des portions de l'échantillon de forage de « Telegraph Peak » au Sol 940 et 945. Une sixième et dernière séance d'analyse de nuit sur une portion de l'échantillon de poudre de roche finement tamisée de « Telegraph Peak » contenue dans l'instrument CheMin est effectué dans la soirée du Sol 948, afin de mener à bien une dernière analyse de nuit.

Les analyses préliminaires des échantillons recueillies lors des trois forages effectués à « Pahrump Hills » sur les huit premier mètre de dénivellation, ont dévoilé un profile verticale d'ingrédients chimiques et minéralogiques très différents. Par exemple, les échantillons de « Confidence Hills » situé à la base de « Pahrump Hills » à 40,49 mètres d'altitude par rapport au niveau moyen de dénivellation mesuré à partir de la zone d'atterrissage du rover, contenaient plus de minéraux argileux et d'hématite, dont la formation est favorisée par un environnement humide et neutre. Tandis que les échantillons venant de « Mojave 2 » qui se trouve à 0,95 mètre de dénivellation plus haut, contenaient plus de jarosite qui exige la présence de soufre dans un environnement humide qui est rendu plus acide par sa présence. Les échantillons de « Telegraph Hills » (47,98 mètres) situés dans la couche de dénivellation la plus haute à 6,54 mètres, et de 7,49 mètres par rapport à « Confidence Hills », contiennent une concentration plus forte de silice et de quartz d'origine basaltique (10%), qui est typique des régions humide plus neutre. Le retour à « Garden City », qui est une région situé un peu plus haut à douze mètres d'altitude, est rendu nécessaire pour essayer de mieux comprendre l'évolution du profile verticale de la région. Pour comparaison, les forages effectués à « Glenelg » étaient situé à environ -19 mètres, tandis que celui de « Kimberlay » était à une altitude de dénivellation intermédiaire de 22,45 mètres.

Le robot franchis le cap de son dixième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars le 16 avril 2015 (Sol 957). Le rover reprend la route en longeant les parois de la petite vallée « Artist's Drive », et parcours une distance de 315,89 mètres en sept séances de roulement quotidienne entre les Sols 949 et 958 (Figure 116 à 118). Durant cette dernière série de

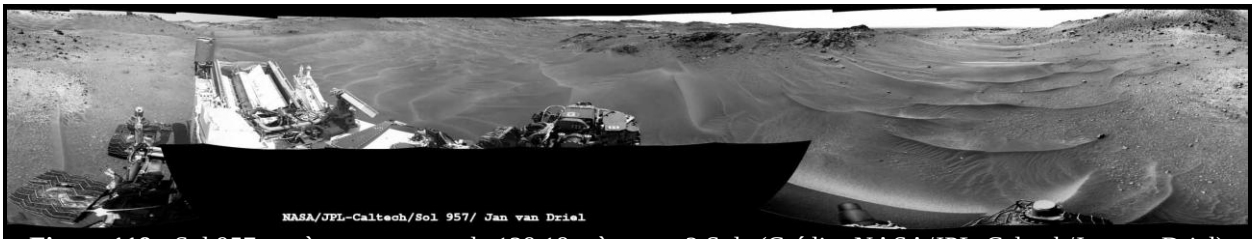


Figure 118 : Sol 957, après un parcours de 129,18 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 119 : Sol 960, après un parcours de 121,82 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Iñaki Docio)

Figure 120 : Sol 964, après un parcours de 49,59 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Iñaki Docio)

Figure 121 : Sol 976, après un parcours de 169,22 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Iñaki Docio)

déplacement, le reste de l’échantillon finement tamisé de « Telegraph Peak » utilisé pour l’expérience Sam, est vidangé sur le sol martien au Sol 954 pour effectuer une longue séance d’intégration APXS de nuit. Trois jours plus tard à la hauteur de « Grey Wolf Peak » au Sol 960 le 19 avril 2015, un nouveau panorama est entamé avec les caméras de navigation (NavCam) pointant dans la direction du passage étroit de « Logan Pass » (Figure 119, l’escarpement rocheux de teinte sombre en haut vers le centre). Il s’agit d’un passage que l’on peut également voir au centre de la partie supérieur de la figure 120. Le rebot effectue le même jour la treizième séance de roulement quotidien supérieur au cent mètres avec une distance parcourus de 100,1 mètres. La décision fut prise de changer la trajectoire du robot au Sol 963, afin de le diriger vers une nouvelle cible d’intérêts géologique qui se trouve un peu plus loin vers l’ouest en direction de la petite vallée étroite dénommée « Logan’s Run ». L’astromobile utilise son outil de brossage DRT au Sol 975 pour nettoyer la surface d’une cible de roche finement stratifié baptisée « Albert », en prévision d’une intégration de nuit qui sera effectué par le spectromètre APXS. Il s’agit d’un affleurement de roches stratifiées qui fait partie d’un petit escarpement situé à la base de « Mt. Shields », formé d’un empilement de fine lamelle de grès très fragile.

Figure 122 : Sol 978, après un parcours de 1,68 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 123 : Sol 981, après un parcours de 27,39 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 124 : Sol 983, après un parcours de 20,52 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

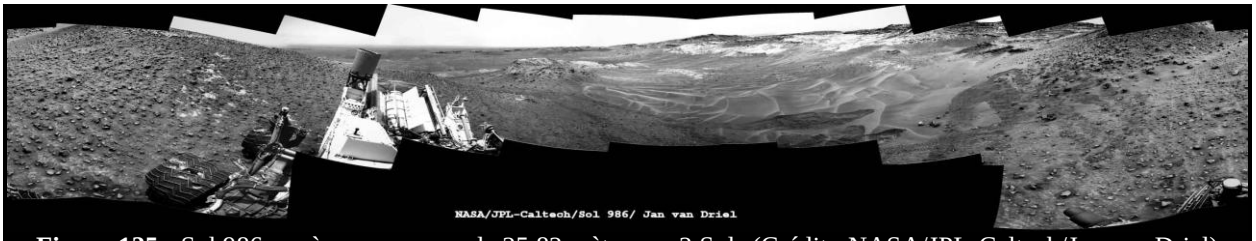


Figure 125 : Sol 986, après un parcours de 25,82 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

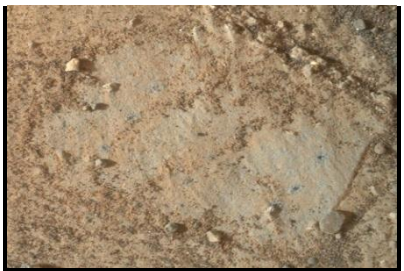


Figure 126 : Spokane (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

L'instrument SAM est utilisé au Sol 976 le 6 mai pour faire une analyse atmosphérique, toujours dans le but de rechercher des traces de méthane et de déterminer la concentration de gaz nobles. En partant de la gauche et en se dirigeant vers la droite sur la vue panoramique de la figure 121. Nous retrouvons la petite butte « Jocko Butte » qui se trouve juste devant le rover, suivit par le passage « Jocko Chute » qui débouche sur le col « Logan Pass », et encore un peu plus loin derrière juste au bout de la vallée « Jocko Chute », nous retrouvons vers le centre de l'image le flanc nord de la colline « Mount Stimson ». La partie centrale du panorama est occupé par les parois rocheuses du flanc nord-est de la colline « Apikuni Mountain », dont le flanc nord-ouest délimite l'entrée du col « Marias Pass », et un peu plus loin à droite nous retrouvons le site de « Logan's Run » situé au pied de « Mt. Shields ». Nous retrouvons les mêmes détailles sur une vue plus rapproché dans l'image du panorama de la figure 122 prise au Sol 978. Dix jours plus tard, après avoir étudiés plusieurs affleurements

Figure 127 : Sol 993, après un parcours de 122,69 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

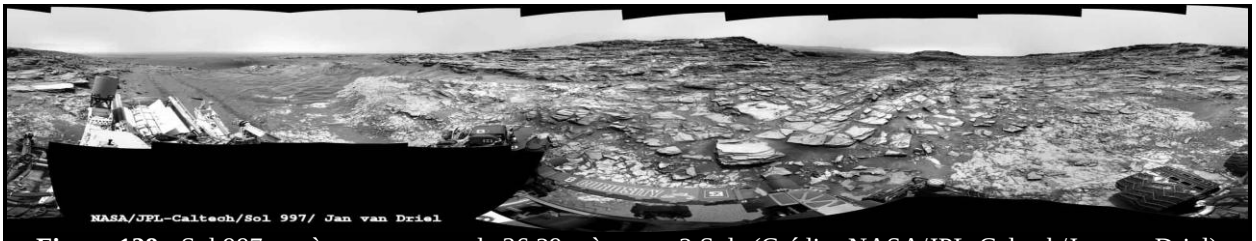


Figure 128 : Sol 997, après un parcours de 36,29 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

rocheux intéressants le long de sa route (Figure 122 à 125), et effectué la mise à jour des logiciels de ChemCam au Sol 981, afin de compensé par une méthode alternative la perte de l’utilisation du petit laser qui servait au réglage et à la mise au point de l’autofocus de l’optique de l’instrument. Ce qui va redonnée à l’instrument la possibilité de faire des campagnes de tirs de laser groupées très précis sous différentes formes d’alignement, tout en permettant de mieux caractériser la variabilité de la composition chimique locale. Ce qui n’a pas été fait depuis le Sol 801, comme le montre la nouvelle série d’alignement de tirs du laser LIBS exécuté sur la cible « Spokane » au Sol 989 (Figure 126). Et vu que la route à travers « Logan Pass » est plus difficile que prévue (Figure 122 à 125), à cause des pentes fortement inclinées et un glissement trop importent des roues du rover sur le terrain. Curiosity qui a passé la nuit sur une pente inclinée de 21 degrés, rebrousse chemin au Sol 986 et repasse à travers « Jocko Chute » pour rejoindre « Logan’s Run » en parcourant un total de 94,53 mètres en deux séances de roulement quotidien (incluant pour la première fois une séquence de deux séances de conduite sur le Sol 990), avant de s’immobiliser devant l’entrée du col « Marias Pass » au Sol 990 le 20 mai 2015 qui marque le début de « Emerson Plateau » (formation Stimson). Le rover aura l’occasion de rencontrer à plusieurs autres reprises des dépôts de grès éoliens faisant partie de la formation Stimson (du groupe Siccar Point composée de dunes de sable basaltique lithifiées) qui tapît la couverture résistante de la formation Murray. L’astromobile entame doucement l’ascension des pentes à travers le col étroit de « Marias Pass », en parcourant une distance de 22,19 mètres dès le lendemain au Sol 991.

Après avoir parcouru 5,97 mètres au Sol 992 (Figure 127) et 36,29 mètres entre les Sols 995 et 997 (Figure 128). L’astromobile s’arrête devant un petit escarpement peu élevé situé à la base de « Apikuni Mountain » pour en évaluer la stratigraphie. Il s’agit d’un terrain où se dessine la jonction de deux types de formation géologique différente, soit la formation sédimentaire de la couche sous-jacente dénommée « Murray » qui a été étudié abondamment au site de « Pahrump Hills » composé de roche claire, et la formation de la couche supérieure composée de roche plus sombre désignée par « Stimson ». Cette région situé juste à la base de la colline « Apikuni Mountain » est visible au centre de la figure 128, et dans la partie gauche de la figure 127 situé à l’extrémité supérieure droite du terrain qui à une teinte plus blanche suivit à droite du flanc sud de la colline « Mt. Shields ». Mais il est temps de préparer le robot pour passer à travers la longue

Figure 129 : Sol 1035, après avoir parcourus 40,17 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

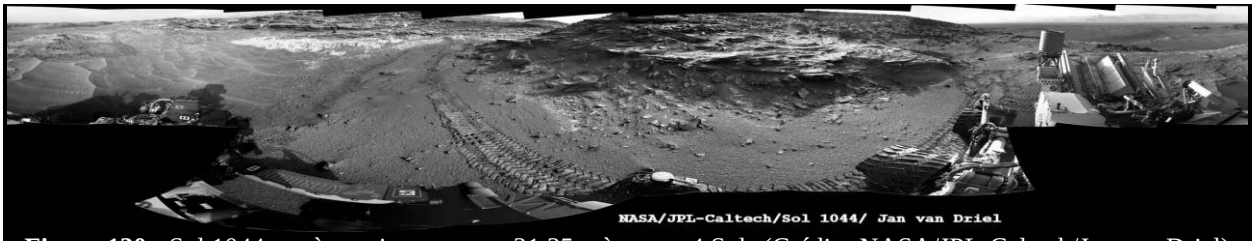


Figure 130 : Sol 1044, après avoir parcourus 31,35 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

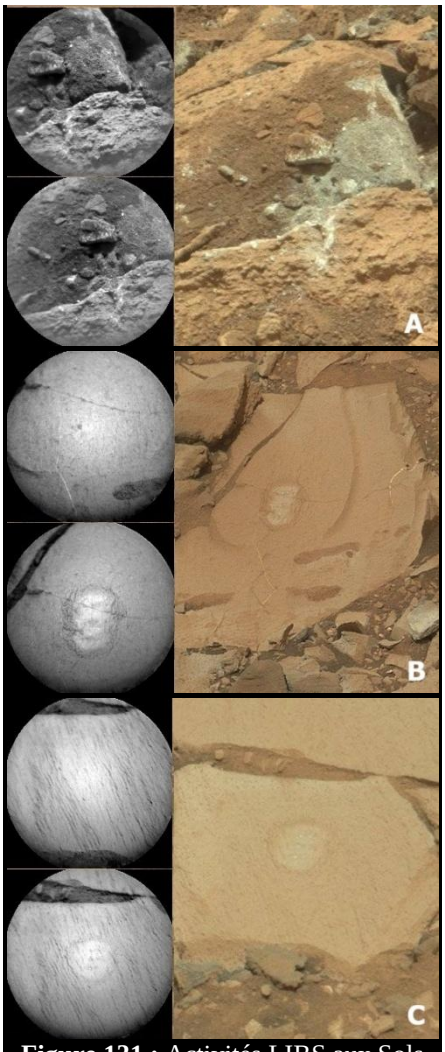


Figure 131 : Activités LIBS aux Sols 1037 (A), 1039 (B) et 1041 (C) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

période de silence radio qui aura lieu lors de la deuxième conjonction solaire entre les Sols 1004 et 1025, soit du 3 au 25 juin 2015. La préparation de la zone de travail consiste à nettoyer la poussière qui se trouve à la surface de plusieurs cibles de roches, comme sur la roche finement laminée baptisée « Ronan » au Sol 998, visible au centre de la figure 128, et « Walace » au Sol 999. La suite des événements consiste à télécharger les mises à jour qui contiennent la programmation des séquences d'activités planifiées qui seront exécutées quotidiennement en mode automatique durant la conjonction solaire. Après trois semaines de silence radio, la communication avec le rebot reprend normalement le 25 juin au Sol 1025, et cinq jours plus tard sur le Sol 1030, l'instrument REM mesure une température journalière qui passe de -15 °C le jour à plus de -77 °C la nuit.

L'analyse des données pris sur le site « Elk », visités antérieurement aux Sols 991 et 992 avec les instruments DAN (Dynamic of Albedo Neutrons) et ChemCam, ont dévoilées des résultats intéressants sur la teneur en silicium et en hydrogène pouvant trahir la présence d'argile. L'instrument DAN a pour tache de mesurer le tau d'hydrogène contenu dans la couche superficielle du sol martien durant le trajet de l'astromobile, et pour se faire l'instrument est muni d'un détecteur de neutrons lents qui s'échappent de la surface de la planète. L'accumulation des données va servir d'indice pour établir le tau d'hydratation des sols et des minéraux pour les différents type de terrains traversés par le rover, ce qui va nous aider à retracer l'histoire géologique de cette région de la planète Mars. Après avoir observé une éclipse partielle de Déimos au Sol 1032 et

Figure 132 : Sol 1051, après avoir parcourus 26,46 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 133 : Lion au Sol 1053, après avoir parcourus 4,35 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

effectué l’étude de la roche riche en silice baptisée « Missoula » entre les Sols 1031 et 1034 (Figure 137). Dans le but d’effectués des mesures complémentaire, le robot Curiosity fait marche arrière au Sol 1035 le 5 juillet 2015 pour rejoindre une nouvelle fois le site « Elk » entre les Sols 1037 et 1041 (Figure 129 à 131). Le rover fait ensuite demi-tour pour revenir sur ses pas au Sol 1042, mais en cours de route une semaine plus tard au Sol 1049, une nouvelle destination est sélectionnée de l’autre côté de « Marias Pass » sur un escarpement peu élevé situé à la base du flanc nord-ouest de « Apikuni Mountain ». L’astromobile fait marche arrière pour la troisième fois en deux semaines pour se diriger vers se nouveau site d’intérêt géologique dénommée « Lion », que le robot rejoint quatre jours plus tard au Sol 1053 le 24 juillet 2015 (Figure 132 et 133) après avoir franchis une courte distance de 21,7 mètres en trois séances de roulement quotidien. Le plancher du site est formé d’affleurement clair bordé par un escarpement peu élevé composé d’un empilement de roche plus sombre et finement stratifié, dont certaine sont fortement érodée et présente de très fines lamelles sédimentaires d’aspect très friable et fragile. La faible gravité Martienne permet de maintenir en équilibre les parties qui sont dégagées par l’érosion, tout en dessinant des motifs feuilletés étranges composés de fine lamelle maintenue en suspension dans les airs.

Figure 134 : Buckskin (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 135 : Cinquième autoportrait Sol 1065 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Doug Ellison)

Les préparatifs pour amorcer la septième campagne de forage de la mission commence au Sol 1057 le 28 juillet, avec le brossage de la surface et du perçage d’un petit trou sur une cible de roche se trouvant sur le pavé d’affleurement « Buckskin ». Le forage de test est effectué deux jours plus tard sur le Sol 1059, suivis après analyse du forage principal qui est exécuté avec succès dès le lendemain au Sol 1060 le 30 juillet (Figure 134). Après avoir effectué plusieurs

Figure 136 : Sol 1073, après avoir parcourus 128,91 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

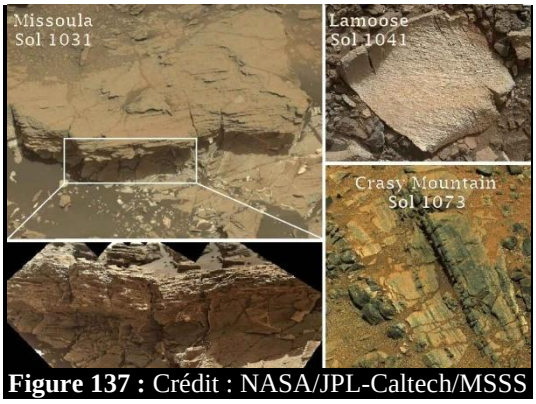


Figure 137 : Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS

analyses sur le site, l'échantillon récolté est tamisé puis une portion est présenté à l'instrument CheMin pour effectuer une analyse minéralogique de nuit au Sol suivant. L'astromobile exécute ensuite le cinquième autoportrait de la mission au Sol 1065 (Figure 135), et fête son troisième anniversaire à la surface de la planète Mars le lendemain au Sol 1066 le 6 août 2015. Le rover quitte définitivement le site du septième forage au Sol 1066, et parcours 18,7 mètres vers le sud-est afin de revenir se repositionner devant la cible « Missoula » au Sol 1067 (Figure 137). La partie supérieure de teinte plus foncée de « Missoula » fait partie de la formation Stimson, tandis que la partie plus base de teinte plus claire fait partie de la formation « Murray », cette dernière est traversé par un réseau de veines blanche composée de sulfate de calcium. Après l'étude de l'affleurement « Crasy Mountain » au Sol 1073 le 13 août (Figure 136 et 137), l'astromobile quitte définitivement le col « Marias Pass » pour se diriger vers le sud-ouest en se déplacent à travers un ensemble de petites lignes de crête et de dépressions peu profondes. Trois jours plus tard au Sol 1076, l'instrument SAM reçoit une partie de l'échantillon tamisé de « Buckskin », dans le but d'effectuer une expérience EGA dont les résultats ont révélés pour la première fois la présence de Tridymte cristalline (SiO_2), minéral de la famille de la silice qui est un indisateur d'une activité volcanique siliceuse. Par la suite, le rover Curiosity parcourt une distance de 245,8 mètres en 10 séances de roulement quotidien entre les Sols 1078 et 1100 (Figure 138 à 145), en serpentant à travers un terrain composé de plateaux (« Bridger Basin » Sol 1097-1105) et de petites vallées rocailleuses peu profondes.

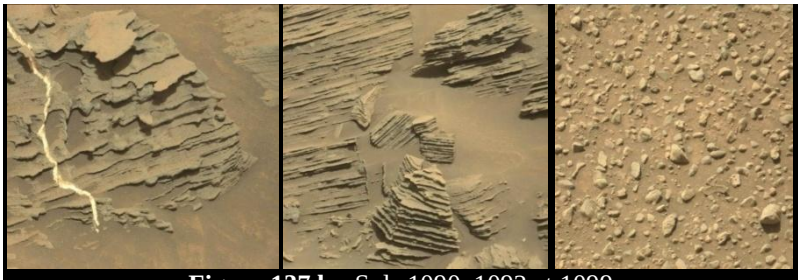


Figure 137 b : Sols 1090, 1092 et 1099
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Le robot franchit le cap de son onzième kilomètre parcourus à la surface de Mars le 4 septembre 2015 (Sol 1094). L'astromobile croise sur sa route des affleurements rocheux très variés composé de fine strates, dont certaines très finement feuilletées sont d'aspect très fragile et délicate sculpter par l'érosion, causée par l'action abrasif du sable et des poussières poussés par le vent martien sur une très longue période de temps. Le sol est joncé de gravier et de pierre anguleuse aux formes variées, parsemé par endroits de ligne de faille faisant partie de la formation Stimson, composé de gros grains de grès d'origine éolien, et de petites veines blanche plus claires de la formation « Murray », qui trahissent la présence ancienne de la circulation d'eau

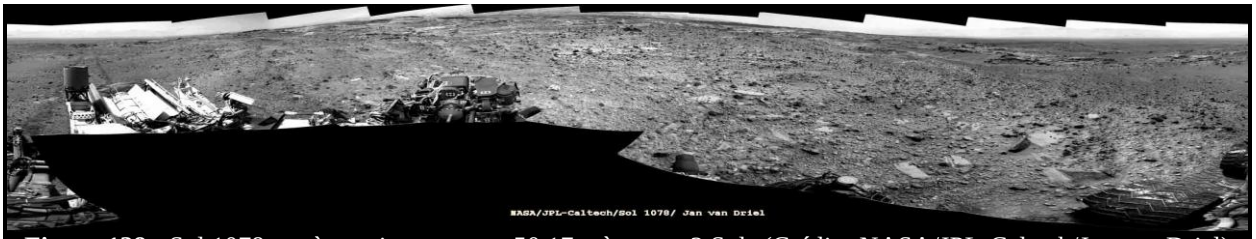


Figure 138 : Sol 1078, après avoir parcourus 50,17 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 139 : Sol 1081, après un parcours de 27,15 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Herobrine-UMSF)

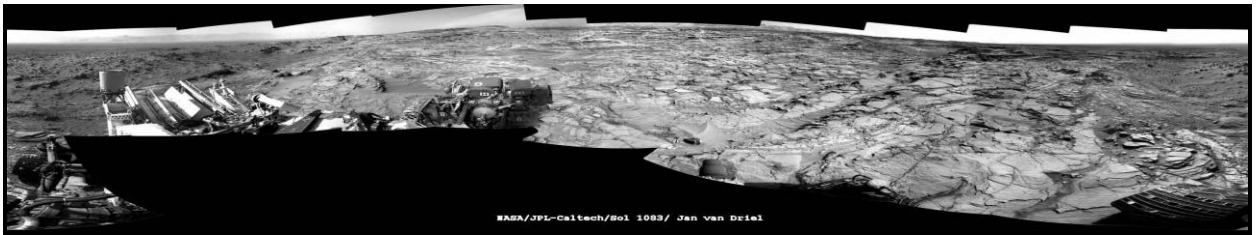


Figure 140 : Willow Ridge Sol 1083, après avoir parcourus 21,7 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

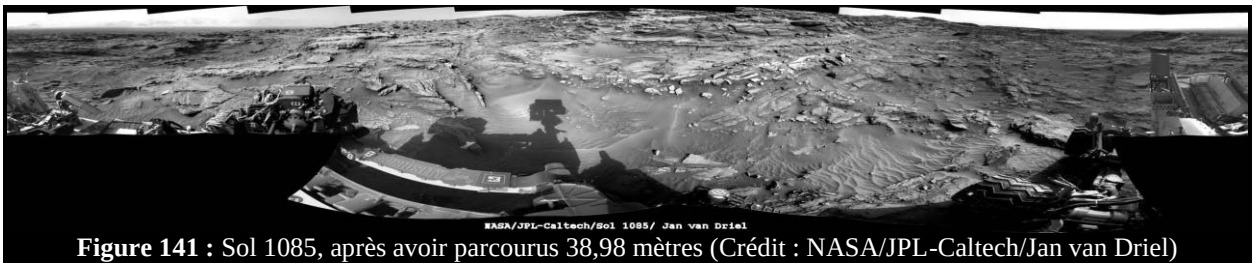


Figure 141 : Sol 1085, après avoir parcourus 38,98 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

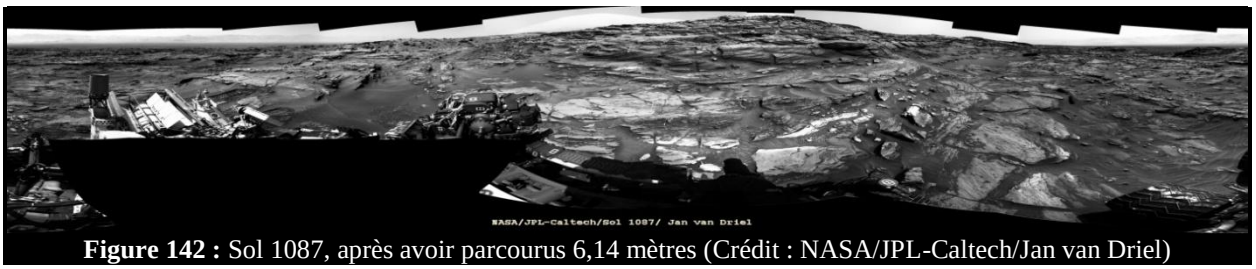


Figure 142 : Sol 1087, après avoir parcourus 6,14 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

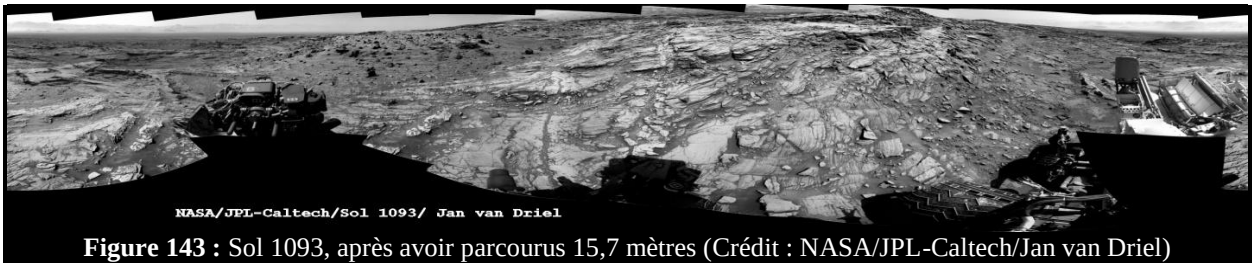


Figure 143 : Sol 1093, après avoir parcourus 15,7 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 144 : Sol 1098, après avoir parcourus 37,62 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 145 : Sol 1100, après 69,73 mètres en 2 Sols (NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora & Marco Faccin)

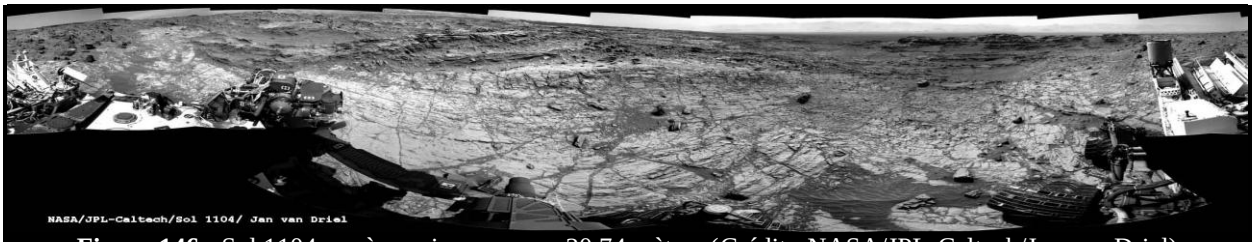


Figure 146 : Sol 1104, après avoir parcourus 20,74 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

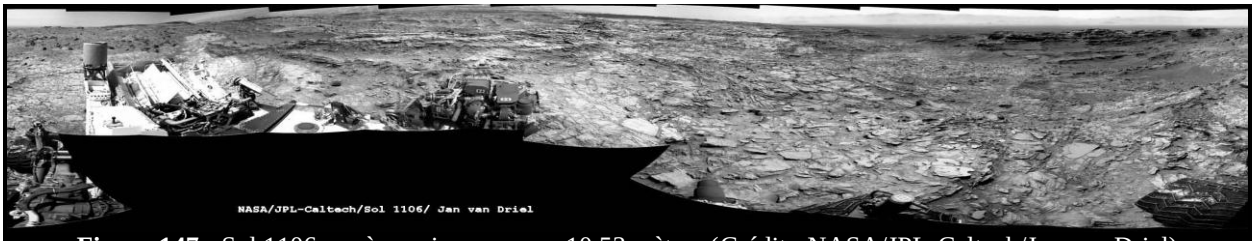


Figure 147 : Sol 1106, après avoir parcourus 10,53 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

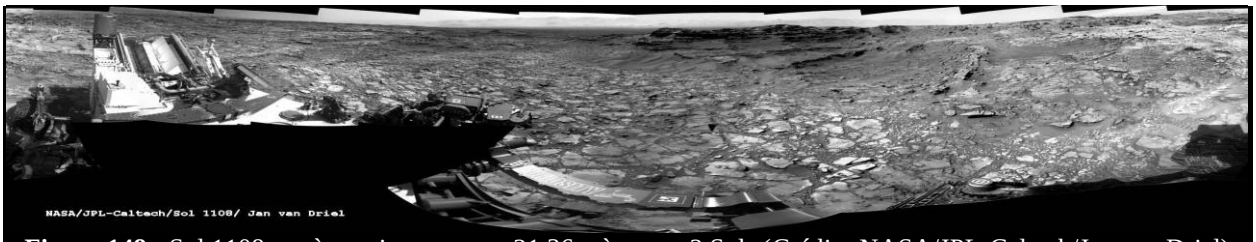


Figure 148 : Sol 1108, après avoir parcourus 21,36 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

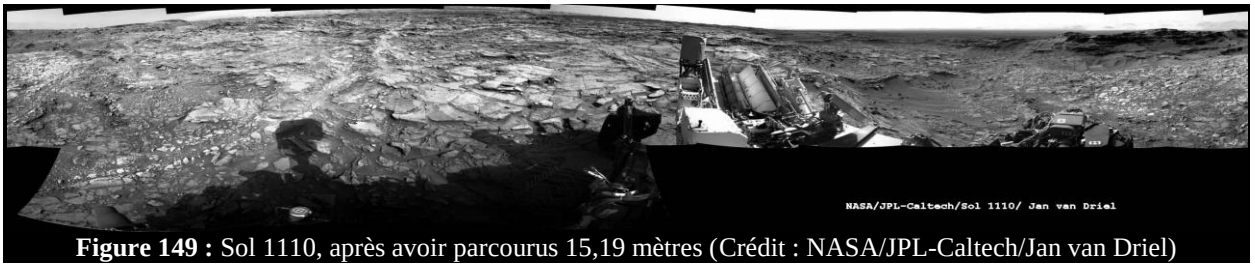


Figure 149 : Sol 1110, après avoir parcourus 15,19 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

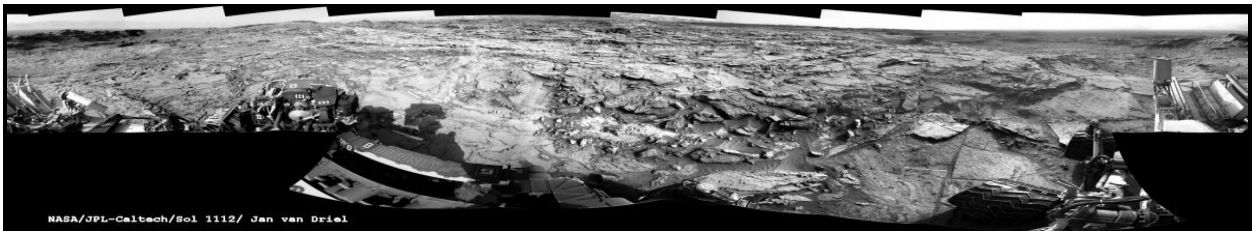


Figure 150 : Sol 1112, après avoir parcourus 14,15 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

et de la précipitation de matériaux aqueux en solution dans un lac de faible profondeur (Figure 137:B). Le mini laboratoire Chemin reçoit une deuxième portion de l'échantillon du forage « Buckskin », pour effectuer une nouvelle analyse de nuit entre les Sols 1078 et 1079. L'instrument SAM va effectuer une analyse atmosphérique de nuit au Sol 1085, et le reste de l'échantillon du forage est ensuite vidangé sur le sol martien au Sol 1089 pour y être analysé par les autres instruments du rover jusqu'au Sol 1092. Les analyses de CheMin de l'échantillon de poudre de roche de « Buckskin » à dévoilé pour la première fois sur Mars la présence de la silice de type tridymite, un quartz d'origine volcanique ou métamorphique qui se forme en générale sous haute pression et à des températures très élevées. Le DRT est utilisé au Sol 1092 pour nettoyer la poussière se trouvant à la surface de l'affleurement « Ledger », puis Curiosity reprend la route vers le sud-ouest dès le lendemain (Figure 143) en direction des bassins « Grizzly » et « Bridger », que l'on peut voir dans la partie gauche et droite des figures 144 et 145. Deux semaines plus tard, après avoir longé la petite crête « Bob Marshall Ridge » et sa falaise « Brady Bradley » bordant le flanc Nord-Ouest de « Bridger Basin », que l'on peu voir dans la partie droite des figures 145 à 148. L'astromobile s'arrête devant la cible « Winnipeg » au Sol 1105, pour l'étudier avec ses différents instruments après l'avoir dépoussiéré avec son outil de dépoussiérage DRT. L'affleurement « Winnipeg », qui fait la jonction entre la formation Stimson et Murray, est utilisé pour faire le suivie de la grosseur des grains de la couche de contacte située entre les deux formations géologique différentes.

Figure 151 : Big Sky et Greenhorn (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 152 : Le sixième autoportrait (NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

Après avoir effectué un court déplacement vers l'ouest, le rover s'arrête devant un nouveau site d'intérêt géologique situé dans l'unité géologique « Stimson » baptisée « Big Sky » entre les Sols 1112 et 1126 (Figure 150). Sur les Sols suivant, Curiosity va effectuer une vaste campagne de science de contacte afin de vérifier la dureté et la stabilité de la roche, et nettoyer la surface de la cible du forage de test au Sol 1114. Après avoir foré le troue de test au Sol 1116, avec prise de vue du micro-imageur MAHLI et effectué une intégration avec le spectromètre APXS, le robot dépoussière la surface de la cible du forage principale situé quelque centimètre plus haut vers la droite. Trois jours plus tard, le rover entame la huitième campagne de forage de la mission au Sol 1119 le 29 septembre 2015 (Figure 151 et 157:A). L'instrument CheMin reçoit une portion de l'échantillon après tamisage de « Big Sky » au Sol 1121, suivit de son analyse

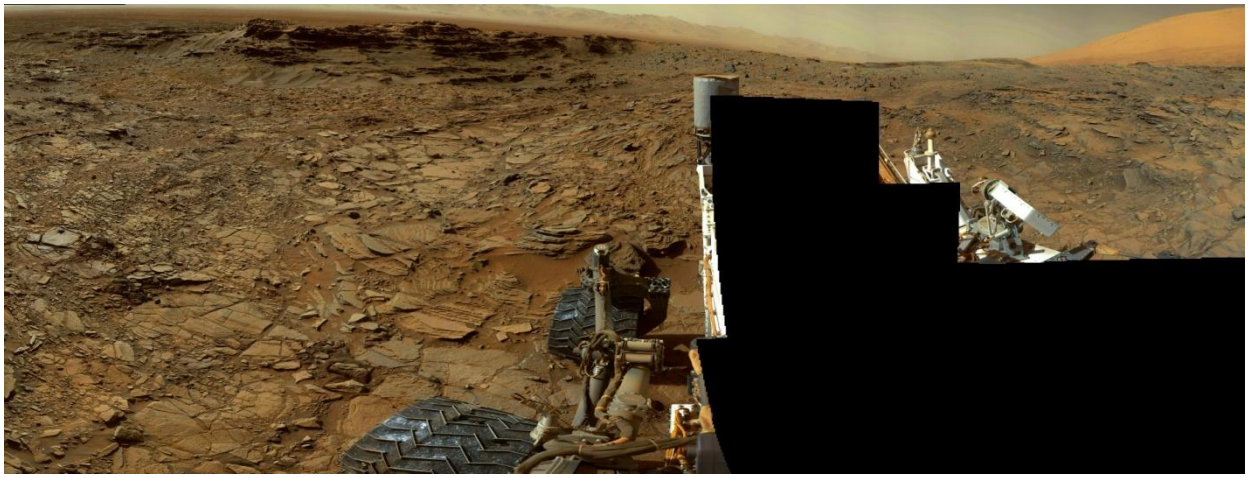


Figure 153 : Sol 1144, après 18,72 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora & Marco Faccin)

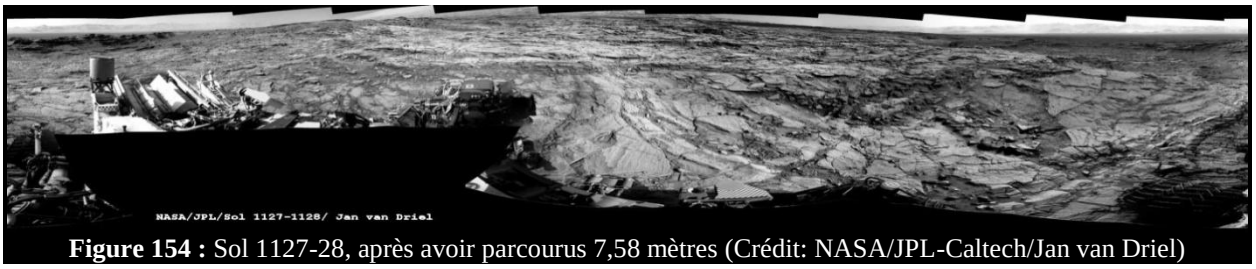


Figure 154 : Sol 1127-28, après avoir parcourus 7,58 mètres (Crédit: NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

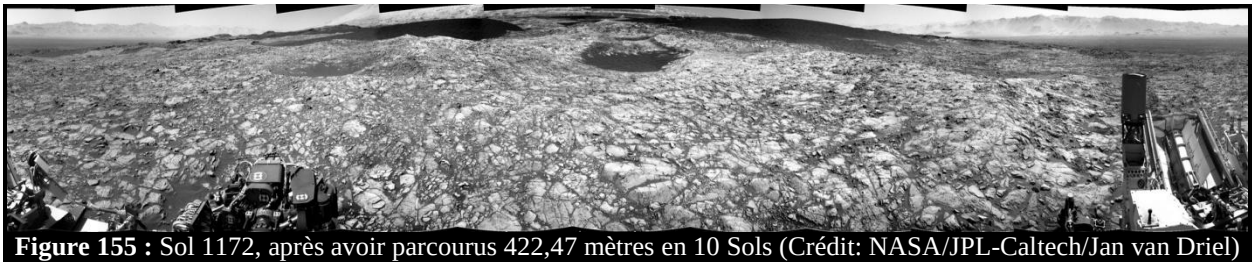


Figure 155 : Sol 1172, après avoir parcourus 422,47 mètres en 10 Sols (Crédit: NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

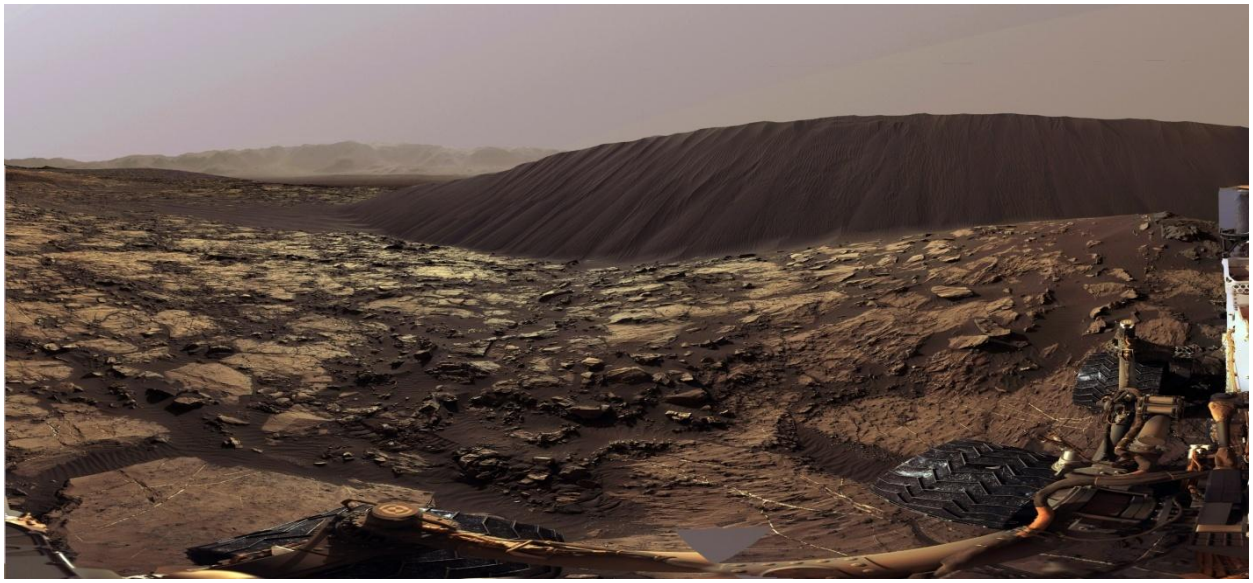


Figure 156 : Sol 1197, après 277,12 mètres en 10 Sols (NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora & Marco Faccin)

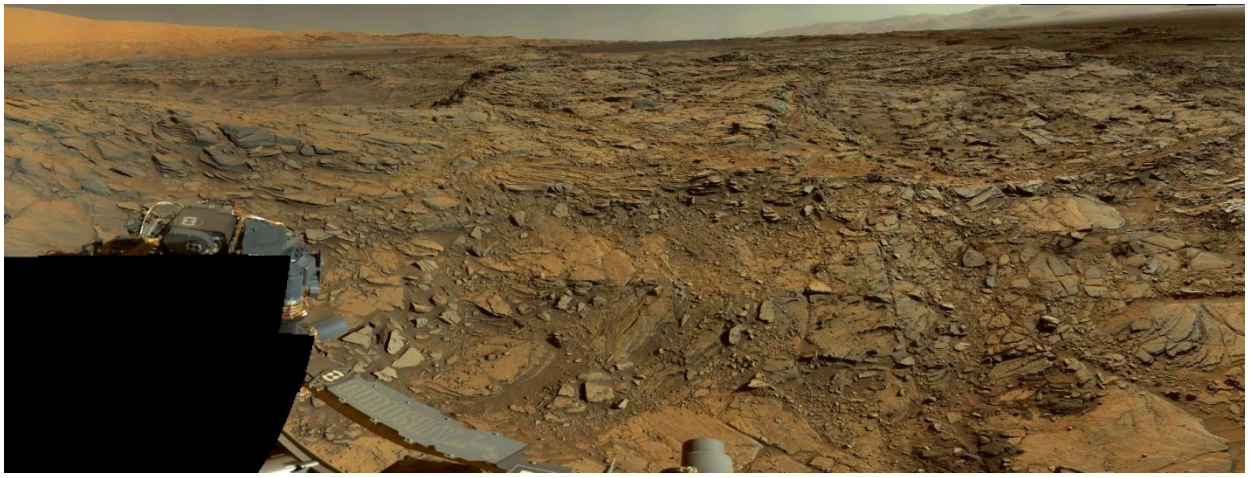


Figure 153 : Suite Sol 1144 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora & Marco Faccin)

cinq jours plus tard sur le Sol 1126. Sur le même Sol, l’astromobile en profite également pour effectuer le sixième autoportrait de la mission (Figure 152). L’astromobile se déplace ensuite sur une courte distance de 7,58 mètres vers le sud-est, pour aller rejoindre le neuvième site de forage baptisé « Greenhorn » (Sols 1127-43) qui se trouve un peut plus haut vers l’est dans une zone de fracture plus brillante enrichie de silice. L’instrument SAM reçoit à son tour une partie de l’échantillon de « Big Sky » au Sol 1130, puis le reste de l’échantillon est vidangé

Figure 157 a : Campagnes de forage Big Sky et Greenhorn (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 156 : Suite Sol 1197 (NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora & Marco Faccin)

Figure 157 b : Tir Laser (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

au Sol 1132, afin de permettre aux autres instruments scientifique de Curiosity d'analyser les résidus. La neuvième campagne de forage est effectuée entre les Sols 1127 et 1143 (Figure 154 et 157:A), et elle débute par le forage de test dénommé « Pilgrim » au Sol 1134. Suivis trois jours plus tard, après avoir bien étudiée la zone de travail qui se trouve un peut plus bas sur un autre pavé d'affleurement, du forage principal « Greenhorn » creusé au Sol 1137 le 18 octobre 2015. L'instrument CheMin reçoit une portion de l'échantillon de poudre de roche tamisée provenant du forage au Sol 1139, puis effectue une analyse de nuit sur le même Sol. Le rover quitte « Bridger Basin » et reprend la route vers le sud-ouest au Sol 1144 le 25 octobre 2015 (Figure 153), en se déplaçant en direction du champ de dune sombre baptisé « Bagnold Dunes » qui encercle la base du mont « Sharp ». En court de route, l'instrument SAM reçoit à son tour une première portion de l'échantillon de « Greenhorn » au Sol 1147 pour effectuer une analyse de nuit, suivit d'une deuxième portion un mois plus tars sur le Sol 1178 le 29 novembre 2015.

Après avoir effectué un parcours de 113,94 mètres en dix Sols de conduite. L'astromobile Curiosity franchit la limite sud-ouest de « Emerson Plateau » au Sol 1154, et après quatre autres semaines de conduite vers les sud-ouest et parcourus près de 400 mètres en neuf séances de roulement quotidien. Le robot Curiosity arrive finalement à la hauteur de la partie ouest du champ de dune sombre « Bagnold Dunes » situé à la base du mont « Sharp » au Sol 1174 le 25 novembre 2015. L'étude des environs débute avec « High Dune » entre les Sols 1174 et 1184. Il s'agit de la première dune que le robot rencontre sur sa route qui fait partie du vaste ensemble de « Bagnold Dunes », et que nous pouvons voir dans la partie supérieure droite de la figure 155 et en gros plan sur la figure 156. Au Sol 1177, le laser LIBS de ChemCam est utilisé pour dessiner un alignement de dix points de trente tirs de laser chacun traversant le sommet d'une petite ondulation de dune (Figure 157:B). L'astromobile se déplace ensuite vers le sud-est pour traverser le petit passage d'environ 80 mètres de largeur qui sépare « High Dune » de « Namib Dune » entre les Sols 1185 et 1192, que nous pouvons également observer dans la partie supérieure gauche de la figure 155. Le reste de l'échantillonnage tamisée de « Greenhorn » est vidangé au Sol 1202 le 24 décembre 2015, afin de préparer et de nettoyer les instruments à recevoir un nouvel échantillon provenant du champ de dune. Le rover se positionne pour étudier la région la plus haute de « Namib Dune » entre les Sols 1196 et 1214 (Figure 156). Il s'agit de la région sud-ouest de la dune qui est à l'abri de l'action des vents dominants. Avec le temps, les vents dominants ont poussé le sable aux grains fin jusqu'à une hauteur de 4 mètres et culminant sur une pente fortement inclinée d'environ 28 degrés. Les dunes de cette région sont très actives, pouvant même se déplacer en ondulant sur le sol martien sur plus d'un mètre par année dans la direction sud-ouest, pointant vers le sommet du mont « Sharp ».

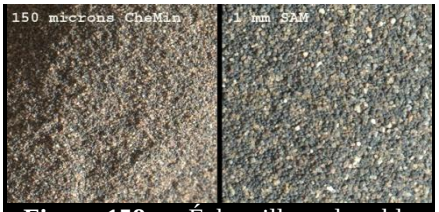


Figure 158 a : Échantillons de sable

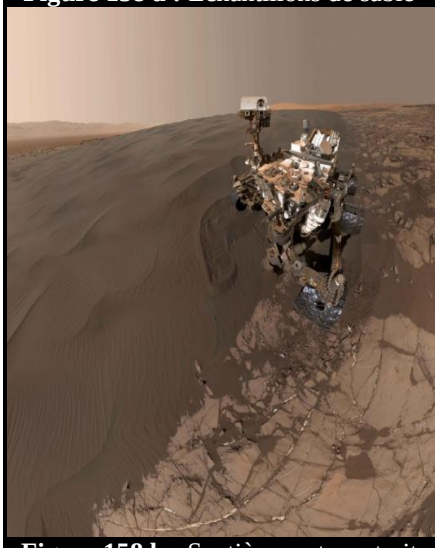


Figure 158 b : Septième autoportrait

Figure 158 c : Pile de dépôts B et D (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

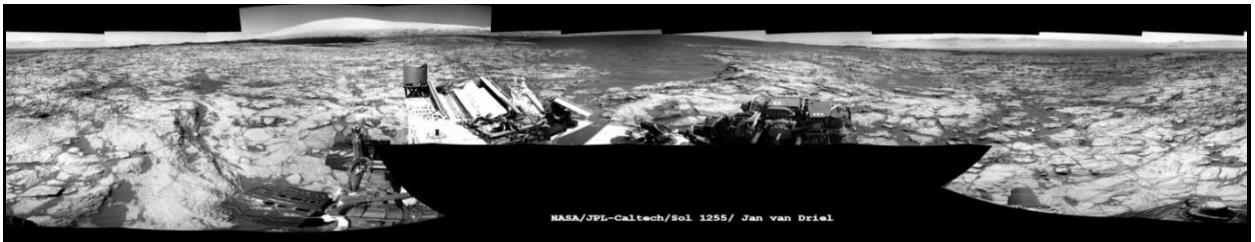


Figure 159 : Sol 1255, après avoir parcourus 283,67 mètres en 9 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

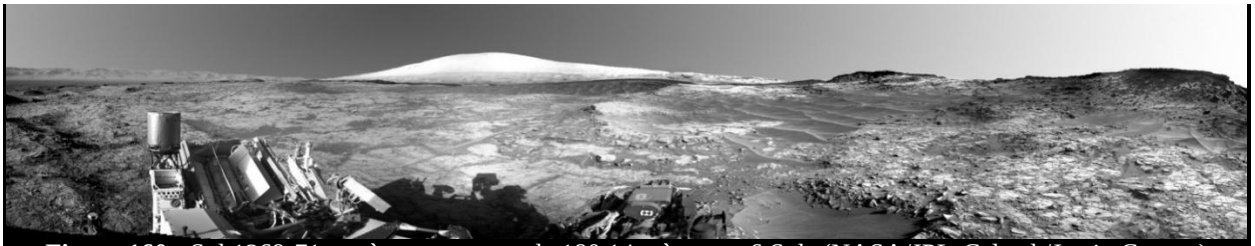


Figure 160 : Sol 1269-71, après un parcours de 180,14 mètres en 6 Sols (NASA/JPL-Caltech/Justin Cowart)

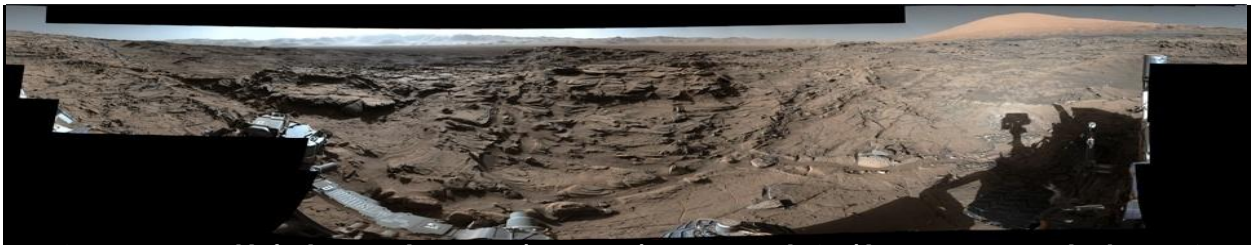


Figure 161 : Naukluft Plateau Sol 1302, après 267,9 mètres en 12 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Curiosity rebrousse chemin en parcourant 110,79 mètres entre les Sols 1215 et 1216, soit quatre jours après le passage du deuxième solstice d'hiver, pour remonter vers la partie nord-ouest de la dune ayant pour objectif de trouver un site qui lui permettra d'examiner de plus près les différents types de grains de sables qui la compose. Le robot se déplace sur une courte distance de 9,29 mètres pour se positionner devant le site baptisé « Gobabeb » entre les Sols 1221 et 1243, et l'étude des grains de sables peut commencer avec le prélèvement de trois échantillons récoltés avec la petite pelle scoop aux Sols 1224, 1228 et 1231 (Figure 158:A). Il s'agit de la deuxième campagne scientifique de la mission à être entièrement consacré à l'étude d'un champ de dune. Mais contrairement à la première campagne d'étude effectuée à « Rockness » entre les Sols 56 et 101, le site de « Gobabeb » présente une teinte beaucoup plus sombre. Le septième autoportrait est effectué sur le Sol 1228, il est composé d'une mosaïque de 57 images prises à l'aide de la caméra MALHI le 20 janvier 2016 (Figure 158:B). Après avoir filtrés les grains de sables, les grains du tamis de 1 mm qui est utilisé pour la première fois sur la planète Mars sont livrés à SAM, tandis que les grains triés plus finement avec le tamis de 150 microns son livrés à CheMin pour faire des analyses de nuit (Figure 158:A). Les zones de dépôts sont également étudier par ChemCam et le laser LIBS avec plusieurs séances de tirs laser aux Sols 1229 et 1236 pour la pile B, et au Sol 1234 pour la pile D, toute en dessinant des motifs étranges sur les cibles (Figure 158:C).

L'astromobile se déplace ensuite de 13,15 mètres vers le sud-est au Sol 1243, pour aller rejoindre de nouveau site d'étude. Après avoir passé plus de 55 Sols près de « Namib Dune », le robot traverse une seconde fois le petit passage qui sépare les deux dunes au Sol 1248, afin

Figure 162 : Lubango avant et après, et Okoruso (Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS)

d'aller compléter son investigation du terrain dans la partie nord-est de « High Dune » durant les six prochain Sols et franchit du même cout le cap de son douzième kilomètre (Sol 1248). Le but est de contourner le champ de dune sombre qui encercle la base du mont « Sharp » par le nord-est dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (Figure 159 et 160), afin d'amorcer l'ascension des pentes en serpentant à travers les collines et les vallées pour rejoindre les roches stratifiées qui se trouvent plus haut, et qui contiennent des argiles et des sulfates détectés par les orbiteurs martiens. L'astromobile arrive ensuite à la hauteur de « Naukluft Plateau » et s'arrête durant une semaine entière, le temps d'étudier le terrain environnant entre les Sols 1274 et 1281. Il s'agit d'une région qui fait la jonction entre la formation Stimson, composée de dune de sables fossilisées sur de longue période de temps dans un climat sec et aride, et la formation géologique Murray de teinte plus claire, qui résulte d'un climat plus doux et humide qui remonte à une époque beaucoup plus ancienne ayant permis la sédimentation des vases et des bouts (mudstone) se trouvant au fond des lacs située à la base du mont « Sharp ». Le rover reprend la route vers l'ouest au Sol 1282, et trois semaines plus tard un problème de court circuit dans le générateur thermoélectrique et radio-isotopique RTG a fait échouer trois séances de roulement consécutif à partir des Sols 1301, 1303 et 1305. Le vaste panorama de 360° prix par la MastCam de gauche au Sol 1302 (Figure 161) composée d'une mosaïque de 138 images individuelles, dévoile un paysage fortement accidenté par un bel après-midi martien. L'astromobile reprend ensuite sa route vers l'ouest au Sol 1309 dans le but de trouver un nouveau site de forage, et ceci, avant de quitter définitivement la formation géologique de grés « Stimson » et de trouver un lieu de passage à travers l'anneau de dunes sombre qui encercle la base du mont « Sharp ».

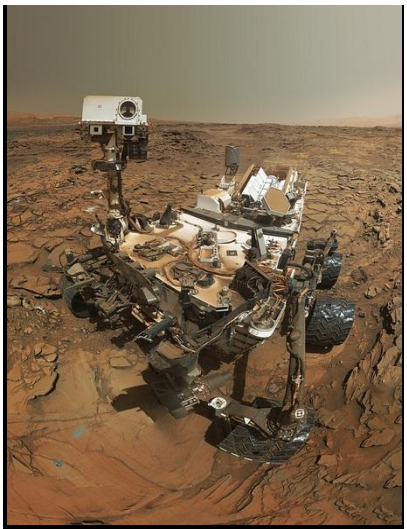


Figure 163 : huitième autoportrait (NASA/JPL-Caltech/Seán Doran)

Curiosity se place devant le dixième site de forage riche en silice baptisée « Lubango », situé au centre ouest de « Naukluft Plateau » dans une zone claire et fracturée de la formation Stimson entre les Sols 1317 et 1328. Et après avoir effectués les études préparatoires de l'affleurement rocheux, la surface de la roche est brossé avec la DRT au Sol 1318, et le forage en question est exécuté deux jours plus tard sur le Sol 1320 le 23 avril 2016 (Figure 162) en creusant un trou d'une profondeur de 6 cm avec 1,6 cm de diamètre. Une partie de l'échantillon finement tamisé du forage est ensuite livrer à l'instrument CheMin au Sol 1323 pour préparer une analyse minéralogique de nuit. Les analyses EGA (Sol 1320) ont confirmé une concentration exceptionnellement élevée de silic (SiO_4). Après avoir rechargé ses batteries et terminer la campagne d'étude d'analyse du site de forage « Lubango ». Le rover se déplace ensuite vers le nord-ouest sur une courte

distance de 13,16 mètres, dans le but de contourner et de rejoindre un nouveau site de forage baptisé « Okoruso » qui se trouve qu’à 3,7 mètres de distance du précédent. Curiosity va étudier le onzième site de forage de la mission « Okoruso » entre les Sols 1329 et 1343, avec brossage de la surface de l’affleurement au Sol 1330 et le forage du troue le 5 mai 2016 (Sol 1332), puis livraison d’une partie de l’échantillon finement tamisé au laboratoire minéralogique CheMin aux Sols 1338, 1342 et 1346, et a SAM pour une expérience EGA au Sol 1344 pour faires des analyses de nuit. L'expérience a servi de référence "témoin" pour comprendre l'altération extrême observée à « Lubango ». L’astromobile entame le huitième autoportrait de la mission au Sol 1338 (Figure 163), afin de documenter les sites de forage « Okoruso » qui est visible au premier plan en bas de l’image, et « Lubango », la petite tache grise derrière l’astromobile visible sous le capteur métrologique REMS situé à gauche du mât.

Figure 164 : Amas de débris au Sol 1342 (NASA/JPL-Caltech/MSSS/Paul Hammond)

L’astromobile fête sa deuxième année martienne de 687 jours terrestre au Sol 1337 le 10 mai 2016. L’analyse comparée de la poudre de roche de « Lubango », situé dans une zone claire près d’une fracture, est plus enrichi en silice et en sulfate par rapport à « Okoruso » situé dans une zone plus foncée. Cette différence peut s’expliquer par différents épisodes brefs d'écoulement d'eaux souterraines ayant remonté à la surface lors d’impactes météoritique. Toute en favorisant l’infiltration d’eau chargée de minéraux et la précipitation d’ingrédients dissous et lessivés depuis d'autres points plus éloignés à travers les fissures des roches pour formés les veines claires, et qui ont été par la suite dégagées par l’érosion. Et après la campagne d’étude du site du onzième forage, et d’un petit amas de débris rocheux qui a cédé sous le poids du rover (Figure 164). L’astromobile reprend la route vers l’ouest au Sol 1344, puis le robot s’arrête devant un nouveau site d’intérêt géologique au Sol 1357 après avoir parcourus plus de 129,62 mètres en six séances de roulement quotidien. Le site du douzième forage situé vers la base de « Naukluft Plateau » est sélectionné moins de 30 jours après la campagne du onzième forage, il est situé sur une fracture de grès faisant partie de la formation Murray. Le site est caractérisé par des pavés d’affleurements rocheux parcourus de veines minérales plus claires. Le forage fut baptisé « Oudam » (Sols 1357-69) et a été exécuté le 4 juin au Sol 1361 (Figure 165). Une première portion de l’échantillon est fournie à l’instrument CheMin pour une analyse de nuit au Sol 1364, et une seconde portion est utilisée pour faire une analyse de nuit programmée pour le Sol 1375 à la hauteur de l’affleurement « Baynes Mountains », de 11 mètres de haut sur 65 mètres de long. Les instruments de Curiosity ont dévoilé la présence d’une forte teneur en silice et en sulfates de calcium ($CaSO_4$) dans les résidus d’échantillonnage du forage, marquant des conditions environemental passant d'un lac profond à des dépôts de rivières ou de courants plus actifs.

Figure 165 : Oudam (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Le rover se remet en route sur le Sol 1369, en changeant sa trajectoire de conduite en virant à gauche pour faire route en plein sud en direction de « Murray Buttes » situé à la base du mont « Sharp ». Le robot se déplace vers le sud-ouest à travers un passage parsemé de petites buttes qui permettra de contourner le champ de dunes sombre « Bagnold Dunes ». L’astromobile doit

Figure 166 : Sol 1421, ayant parcourus 668,11 mètres à partir du Sol 1369 (NASA/JPL/MSSS/Thomas Appéré)

Figure 167 : Marimba (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 167 b : Simulation numérique du rover Curiosity parmi les buttes Murray au Sol 1421 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Seán Doran)

ensuite se diriger vers trois objectifs d'intérêts géologiques qui se trouvent plus haut vers le sud sur les pentes du mont « Sharp ». Le premier objectif est un terrain composé d'hématite (« Vera Rubin Ridge »), le second composé d'argile (« Glen Torridon ») et le troisième est composé de sulfates (« Gediz Vallis ») situé à plus de 7,5 kilomètres de distance. Le 20 juin 2016 (Sol 1376), Curiosity franchit son treizième kilomètre parcourus à la surface de Mars. Au Sol 1382 le 26 juin 2016, une partie de l'échantillon de poussière de roche récolté à « Oudam » est fournis à l'instrument SAM pour effectuer une analyse de nuit. L'astromobile reprend la route vers le sud au Sol 1387 et tourne définitivement le dos à « Naukluft Plateau ». Durant plus d'une semaine entre les Sols 1388 et 1395 à la hauteur de « Helgas Dune », soit du 2 au 9 juillet 2016. L'astromobile est rentré pour la première fois depuis 2013 (Sol 200) en mode sans échec pour une raison inconnu. Après trois jours de vérification des différents systèmes, le rover à repris ses activités normale sur le Sol 1398. L'information préliminaire indique qu'il s'est produit un décalage inattendu dans le transfert de données entre le logiciel de la caméra et le logiciel de traitement de données dans l'ordinateur principal. Deux semaines plus tard arrivant à l'entrée de « Murray Butte », Curiosity se positionne devant un nouveau site entre les Sols 1417 et 1427, qui deviendra la cible de la treizième campagne de forage de la mission baptisé « Marimba » (Figure 167). Après une analyse sommaire du terrain, une première tentative de forage est entamée au Sol 1420, mais cette dernière échoua. Après avoir fait un panorama couleur de 360° de la région avec

Figure 166 : Suite Sol 1421 (NASA/JPL/MSSS/Thomas Appéré)

la caméra de la MastCam de gauche au Sol 1421 (Figure 166), montrant plusieurs buttes visible au loin avec à gauche en arrière plan le mont « Sharp ». Une deuxième tentative de forage est effectuée au Sol 1422 le 6 août 2016, soit le jour même du quatrième anniversaire du robot sur Mars, en fournissant cette fois-ci une plus forte percussion de la perceuse. Les premières analyses de l’instrument CheMin sur l’échantillon de poudre de roche provenant de la treizième campagne de forage seront effectuées dans la nuit à partir du Sols 1425.

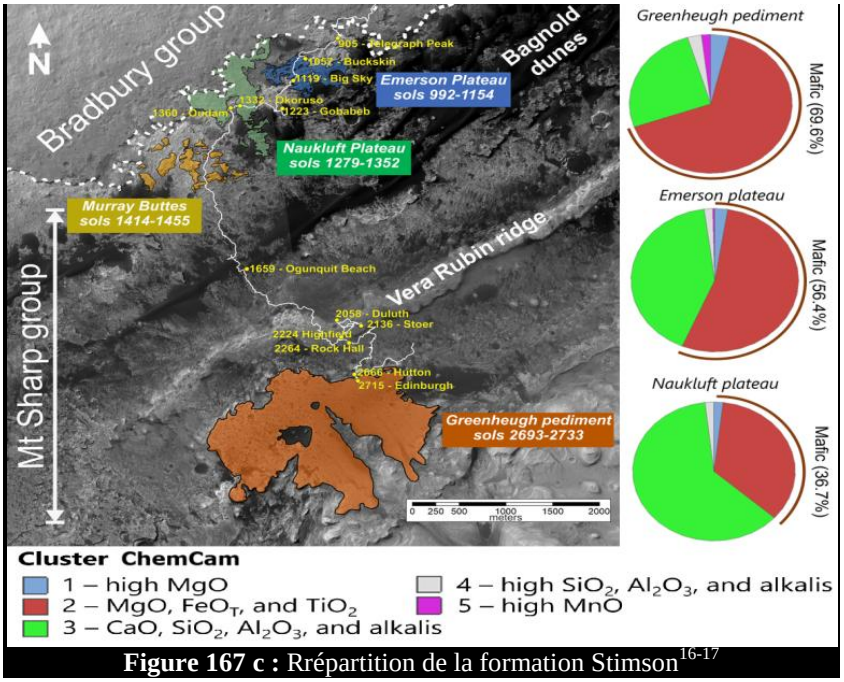


Figure 167 c : Rrépartition de la formation Stimson[16-17]

[16] An Insight Into Ancient Aeolian Processes and Post-Noachian Aqueous Alteration in Gale Crater, Mars, Using ChemCam Geochemical Data From the Greenheugh Capping Unit, 10 March 2022
[17] Sedimentary Architecture of the Stimson Formation at the Naukluft Plateau, Gale Crater, 13 February 2026

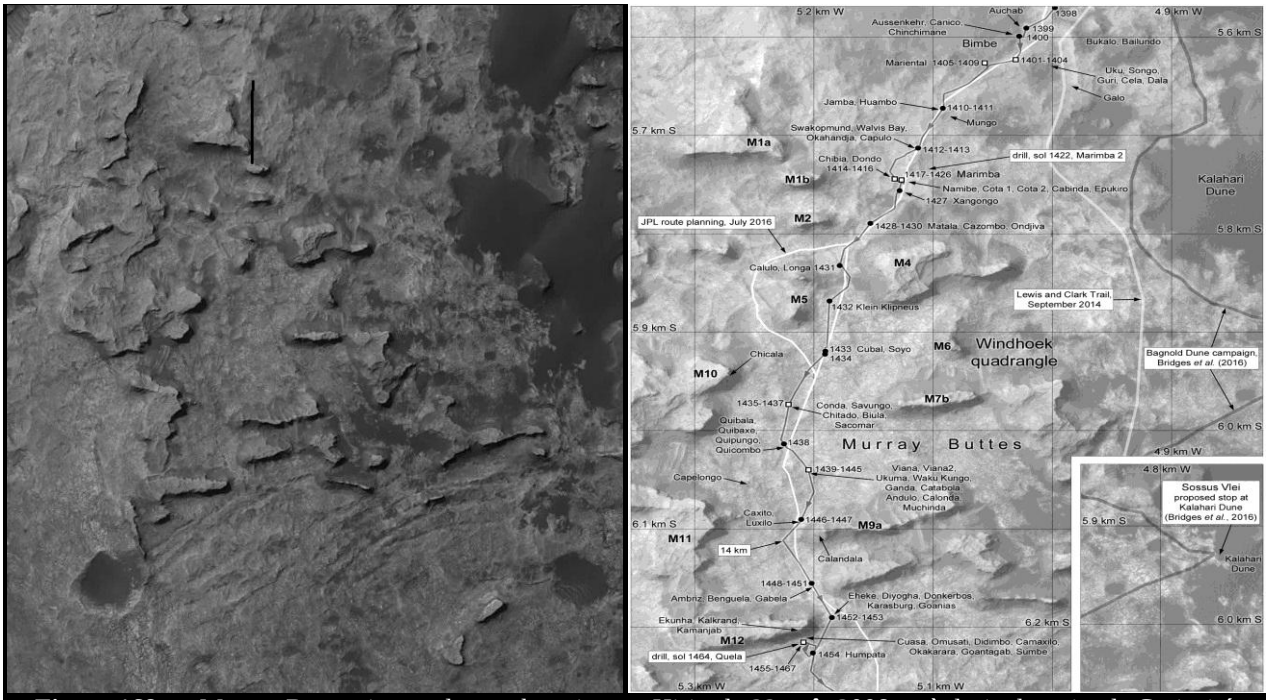


Figure 168 a : Murray Buttes, image de gauche prise par Hirise le 22 août 2008, et à droite le trajet de Curiosité
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/UArizona) (Crédit : Phil Stooke, Université Western Ontario[18])

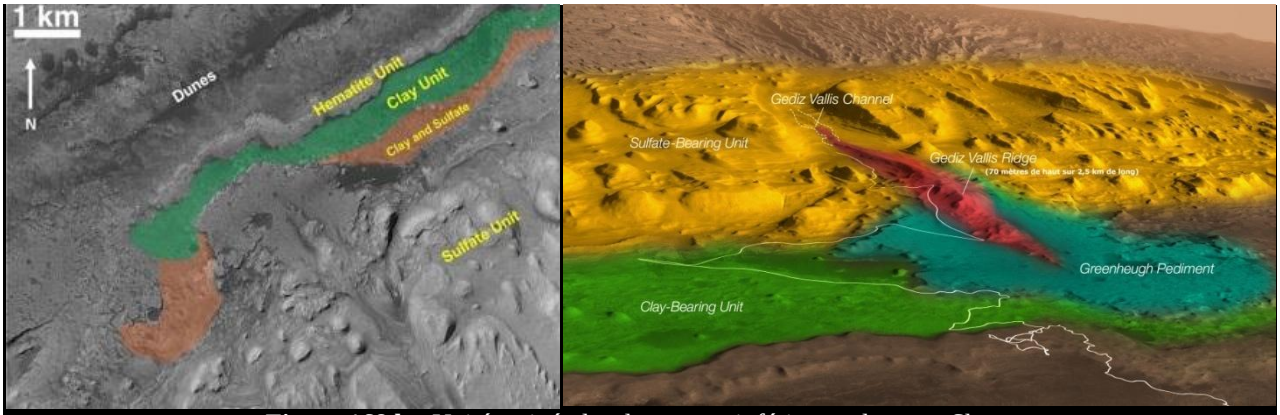


Figure 168 b : Unités minérales des pentes inférieures du mont Sharp
(Crédit : Image à gauche : NASA/JPL-Caltech/MSSS, et l'image à droite : NASA/JPL-Caltech/ESA/Univ. of Arizona/JHUAPL/MSSS/USGS Astrogeology Science Center)

[18] The International Atlas of Mars Exploration: Volume 1-2, Philip J. Stooke, Cambridge University Press 2012-2014

DE MURRAY BUTTES À GEDIZ VALLIS (Sol 1427 à 3199)

Vue le grand nombre de campagnes de forage qui ont été effectuées à partir de cette phase de la mission de 1772 Sols. Les campagnes de forages et les autoportraits seront en mode résumé, afin d'éviter les répétitions et pour ne pas trop surcharger le livre de détails redondant. Nous poursuivons notre aventure martienne au Sol 1427 le 11 août 2016, en roulant tout droit vers le sud dans la direction de « Murray Buttes » (Figure 168:A et 170). Entre les images panoramique des figures 166 et 170, le robot à parcourus une distance de 275,94 mètres en 6 séances de conduite. Les buttes et les mesas s'élevant de 5 à 16 mètres au-dessus de la surface, sont les vestiges érodés de grès anciens qui ont pris naissance lorsque des vents ont déposés du sable sur les pentes du mont « Sharp », ces structures sédimentaires appartiennent à la formation Stimson composée essentiellement de dépôts de grès éoliens (Figure 169). La figure 168:A de la page précédente présente le trajet de Curiosité pendant la traversé de cette région.

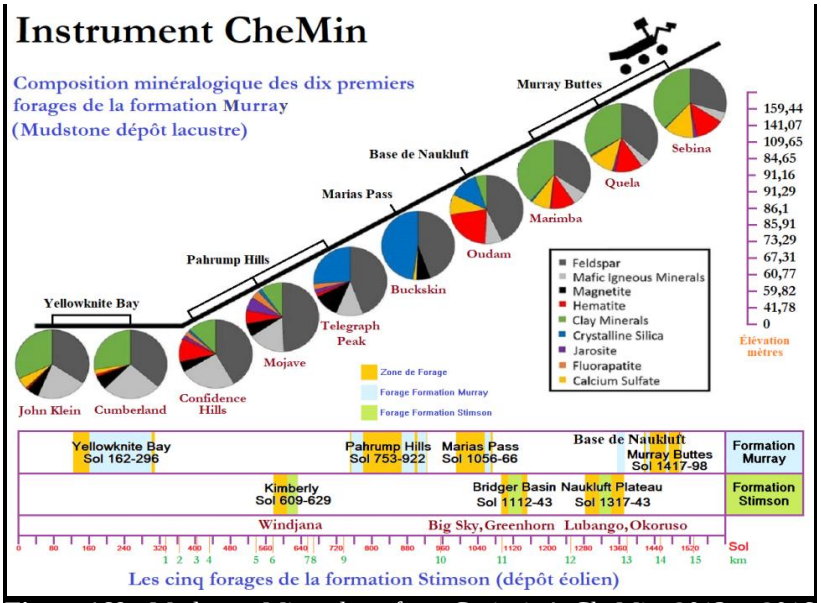


Figure 169 : Mudstone Mineralogy from Curiosity's CheMin, 2013 to 2016 (Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS) (voir ANNEXE)

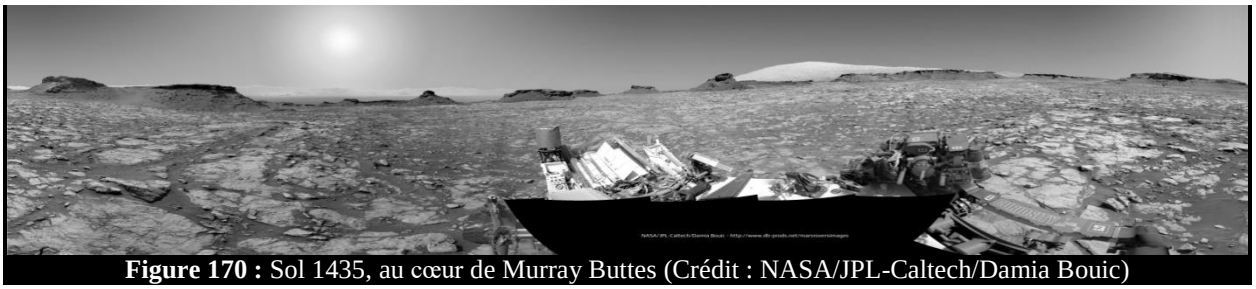


Figure 170 : Sol 1435, au cœur de Murray Buttes (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

Au Sol 1443 le 27 juillet 2016, le rover Curiosity stationnée à mis chemin entre les buttes M7b et M9a (voire la Figure 168:A), se positionne pour examiner avec ses instruments déployé situés au bout de son bras robotique (MAHLI et le spectromètre APXS) pour effectuer une analyse de contact rapprochée à l'aide de sa caméra RMI du micro imager à lentille manuelle MAHLI. L'objectif est de pouvoir déterminer la composition chimique et la texture nodulaire de

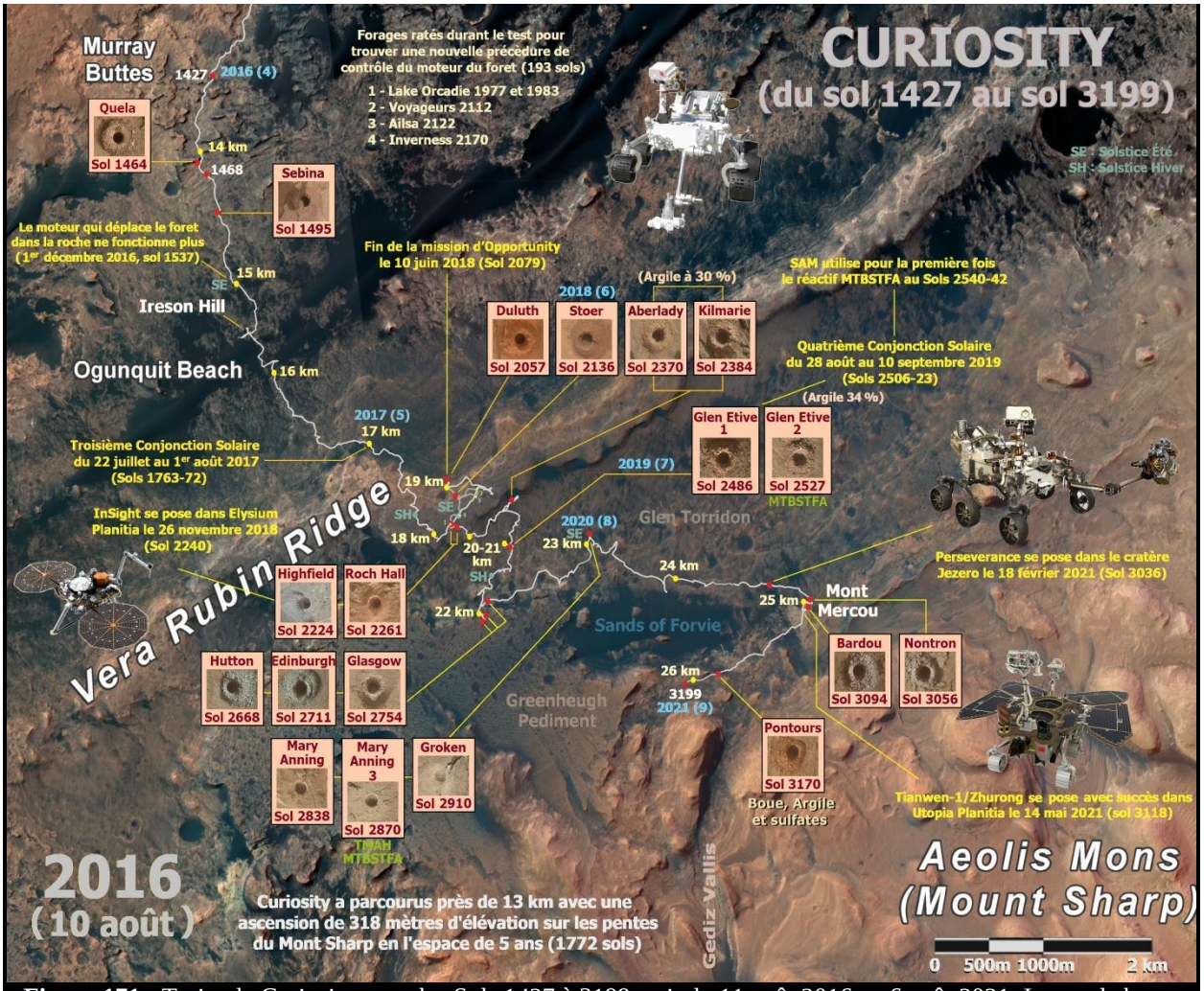


Figure 171 : Trajet de Curiosity entre les Sols 1427 à 3199, soit du 11 août 2016 au 6 août 2021. Image de haute résolution obtenu le 5 août 2021 par la caméra HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) et par la caméra Context de Mars Reconnaissance Orbiter (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 171 A : Sol 1439, après un parcours de 77,23 m en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 171 B : Sol 1446, après un parcours de 53,28 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

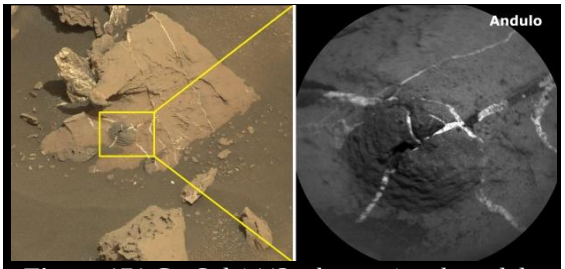


Figure 171 C : Sol 1443, observation de nodule (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

la cible « Andulo », un nodule intriguant incrustrée dans une roche qui est traversé par un réseau de veinnes blanches (Figire 171:C). L'astromobile reprend la route vers le sud en direction de la sortie de la région des « Murray Buttes » au Sol 1446. Le quatorzième kilomètre est franchit par le rover au Sol 1448 le 2 septembre 2016 (Figure 171:D). Et le quatorzième forage baptisé « Quela » (Sols 1457-67) est exécuté le 18 septembre 2016 (Sol 1464) sur une roche faisant partie de la formation Murray (Figure 172 et Ba), et qui se trouve dans la partie sud d'un large pavé d'affleurement parcemée de veines blanche situé à gauche du rover devant la butte numéro 12 de 7 mètres de haut qui marque l'extrémité sud de « Murray Buttes ». Ces nodules témoignent d'une époque où le cratère « Gale » abritait des nappes d'eau liquide chargées en minéraux, qui ont cimenté la roche de manière inégale.

Figure 171 D : Sol 1448, près de la sortie de Murray Buttes et après avoir parcourus 77,82 mètres et franchis la borne du quarorzième kilomètre (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 172 : Sol 1463, devant la butte numéro 12 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Seán Doran)

Figure 172 A : Sol 1478, après avoir effectué un parcours de 313,16 mètres effectué en 9 séances de conduite quotidienne (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

La scène de la figure 172 combine des images prises par la caméra MAHLI installée à l'extrémité du bras robotique du rover le 17 septembre 2016 (Sol 1463). La formation Murray

Figure 172 B : Quela, Sebina, Egg Rock et Ames Knob (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 173 : Old Soaker Sol 1555 (NASA/JPL-Caltech/MSSS/Thomas Appéré)

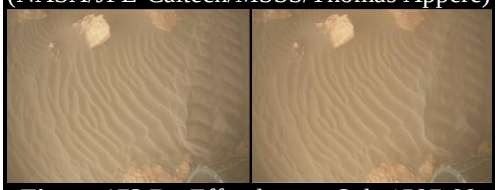


Figure 173 B : Effet du vent Sols 1587-88 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

forme une couche sédimentaire d'environ 400 mètres d'épaisseur situé au niveau du plancher originel du lac à la base du mont « Sharp », composé de dépôts mudstone lacustres (argile et boue) et de Sandstone fluvial (dépôts éoliens de grès à grain grossier et à stratifications entrecroisées plus résistantes à l'érosion). Après avoir effectué une étude détaillée du terrain de « Murray Buttes » et de ses alentours entre les Sols 1414 et 1468 (54 Sols), et parcourus une distance de plus de 602,81 mètres en 14 séances de roulement quotidien (Figure 171 A à D). L'astromobile quitte définitivement les environs de « Murray Buttes » le 22 septembre 2016 (Sol 1468), pour se diriger vers un étroit passage qui se trouve plus au sud qui permettra de contourner par l'ouest le vaste champ de dunes de sable noir « Bagnold Dunes », afin de rejoindre la crête riche en hématite « Vera Rubin Ridge ». Le 19 octobre 2016 (Sol 1494), le rover de démonstration Européen Schiaparelli ou ExoMars EDM (ExoMars Entry, Descent and Landing Demonstrator Module) lancé avec l'orbiteur ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO), s'écrase dans « Meridiani Planum » à environ 54 km au sud-ouest de la position du rover Opportunity qui se trouvait à « Spirit Mound » sur la crête ouest du cratère « Endeavour ». Le module de descente a rencontré des problèmes sur la durée de la séquence d'allumage des rétrofusées. Le quinzième forage est effectué sur la cible « Sebina » (Sols 1489-98) le 20 octobre 2016 au Sol 1495 (Figure 172:Bb), puis le rover reprend la route vers le sud au Sol 1498. Curiosity découvre une petite météorite sombre de fer-nickel de la taille d'un œuf dénommé « Egg Rock » (Figure 172:Bc) le 28 octobre 2016 (Sol 1503), confirmée par la suite par les analyses de ChemCam le 30 octobre. Le rover rencontra sur sa route une deuxième météorite baptisé « Ames Knob » (Figure 172:Bd) plus de dix semaines plus tard en janvier 2017 (Sol 1577). Les météorites rencontrées reposent sur des pavés d'affleurement parsemés de veine claire composée de gypse.

La barre du quinzième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars est franchie au Sol 1526 le 21 novembre 2016. Curiosity s'approche ensuite d'un terrain remplis de roche plates finement stratifié, et après avoir sélectionnée une cible d'intérêt scientifique, le rover entame l'étude du pavé d'affleurement « Old Soaker » (Figure 173) entre le 18 décembre 2016 (Sol 1553) et le 5 janvier 2017 (Sol 1570). La surface de la roche est finement stratifier et très friables, qui présente des réseaux de rayures et de fissures en forme de damier semblable à des fentes de dessiccation lors de la sédimentation d'argile ou de boue passant de zone humide à sec. Des séquences d'images prises lors d'une journée sans conduite juste après le couché du soleil aux

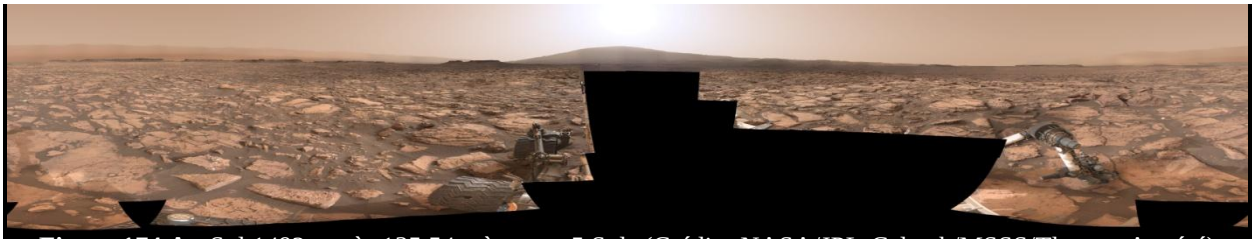


Figure 174 A : Sol 1492, après 135,54 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Thomas Appéré)

Figure 174 B : Sol 1500, après un parcours de 41,6 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

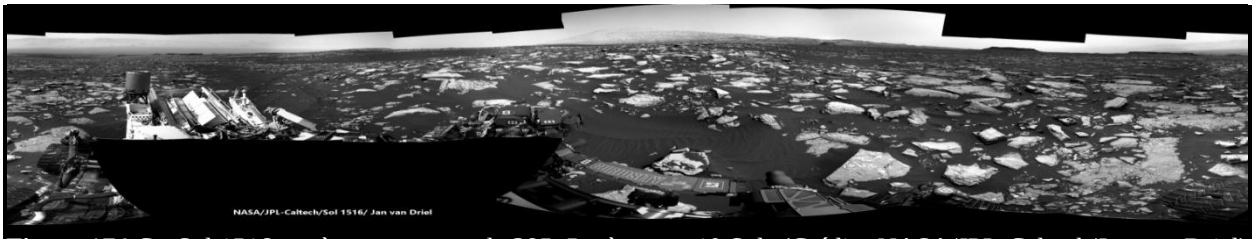


Figure 174 C : Sol 1516, après un parcours de 385, 5 mètres en 10 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

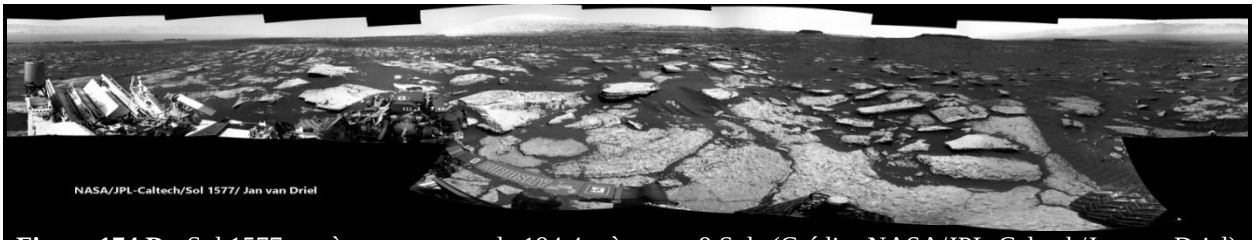


Figure 174 D : Sol 1577, après un parcours de 194,4 mètres en 8 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 174 E : Sol 1589, après un parcours de 188,85 mètres en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

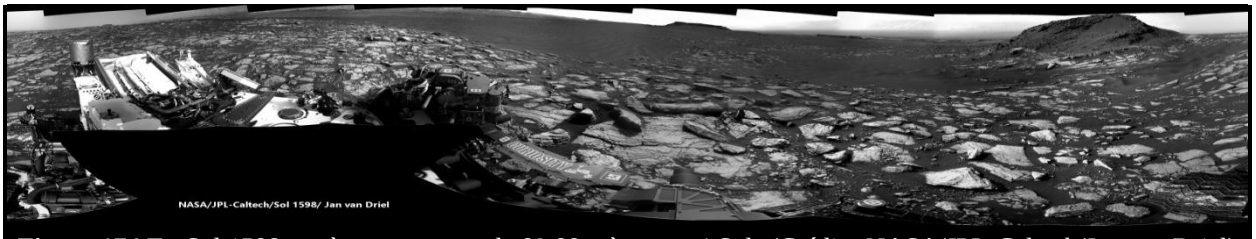


Figure 174 F : Sol 1598, après un parcours de 82,99 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 175 : Sol 1601, à la hauteur d'Ogunquit Beach au sud d'Ireson Hill situé à droite de l'image (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

Sols 1587 et 1588 (22 et 23 janvier 2017) par la caméra MARDI (Mars Descent Imager) situé sous le rover, ont dévoilées les effets du vent soufflent sur le sable se déplaçant sous le rover (Figure 173:B), et la première observation de "Dust Devil" est effectuée au Sol 1597 (Figure 198, à la fin de se chapitre).

L'astromobile reprend la route dès le lendemain en se déplaçant vers la petite butte « Ireson Hil » (Sols 1604-1610) et vers une petite brèche située à la hauteur de « Ogunquit Beach » (Figure 175) qui se trouve plus au sud à l'extrémité ouest de l'uns des nombreux champs dunaire de « Bagnold Dunes » (d'environ 30 km de long et de 1 à 2 km de large), et qui permettra enfin de passer à travers le mur de dunes. Entre les Sols 1602 et 1659, l'astromobile étudie le sable fin de teinte sombre qui compose les dunes lors de la traversée de la brèche « Ogunquit Beach » avec une récolte d'échantillon au Sol 1651. Il s'agit de la deuxième campagne d'étude effectuée sur le sable qui compose les dunes de « Bagnold Dunes », la première campagne (Sols 1174-1255) avait été effectué à « High Dune » et à « Namib Dune ». Les analyses effectuées par les différents instruments du rover sur le dépôt de sable éoliens actif de compositions mafiques de « Bagnold Dunes », sont cohérentes avec une interprétation d'origine volcanique. Durant la traversée du passage à travers « Ogunquit Beach » entres les Sols 1601 et 1672, le rover a parcourus plus de 610 mètres effectuée en 26 séances de roulement quotidien. L'astromobile quitte la zone et s'éloigne de la brèche étroite « Ogunquit Beach » le 6 avril 2017 (Sol 1659), pour s'engager a roulé en direction sud-est vers la crête riche en hématite rouge « Vera Rubin Ridge ». La crête « Vera Rubin Ridge » situé à un kilomètres plus au sud, est une large bande de terre surélevée à la base du mont « Sharp » d'environ 6,5 km de long avec une moyenne de 30 mètres de haut sur

Figure 175 A : Sol 1672, après un parcours de 609,9 mètres en 26 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 175 B : Sol 1680, après un parcours de 146,24 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 175 C : Sol 1698, après un parcours de 232,5 mètres en 9 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

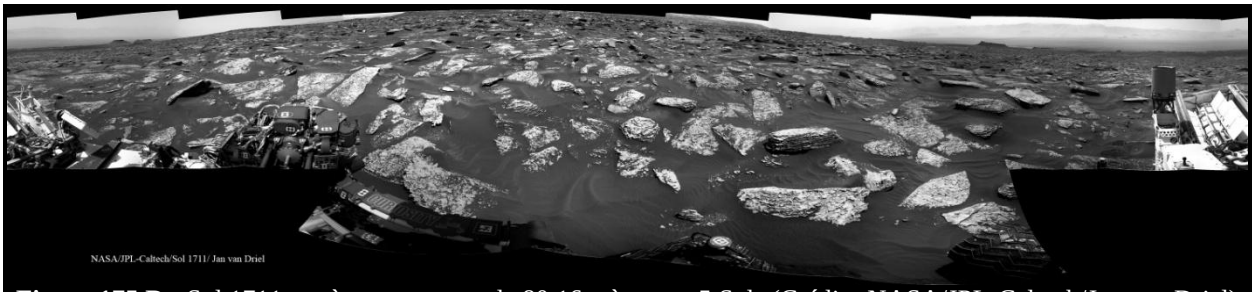


Figure 175 D : Sol 1711, après un parcours de 80,16 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 175 E : Sol 1732-33, après un parcours de 257 m en 11 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

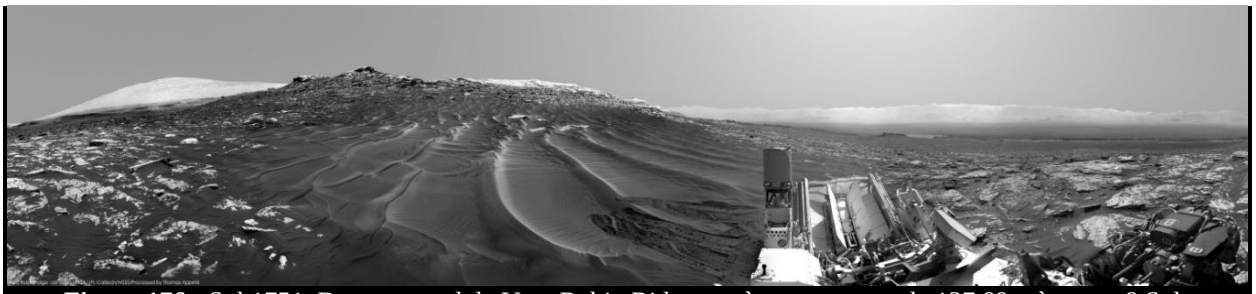


Figure 176 : Sol 1751, Dune au nord de Vera Rubin Ridge, après un parcours de 137,89 mètres en 8 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Thomas Appéré)

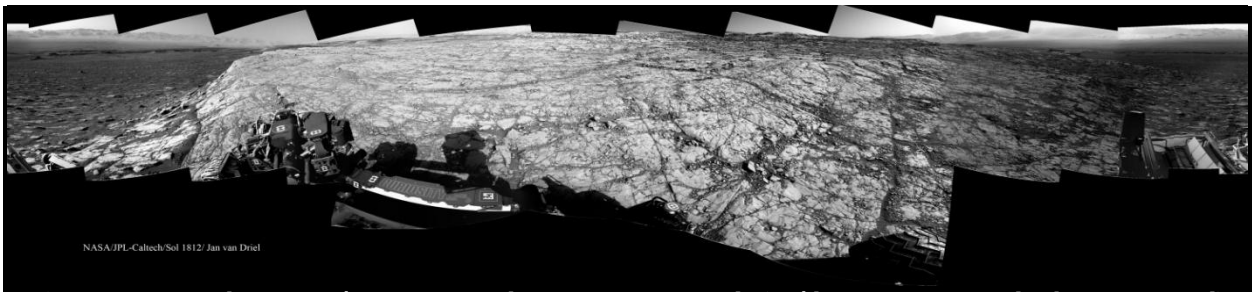


Figure 176 A : Sol 1812, après un parcours de 427,54 m en 20 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

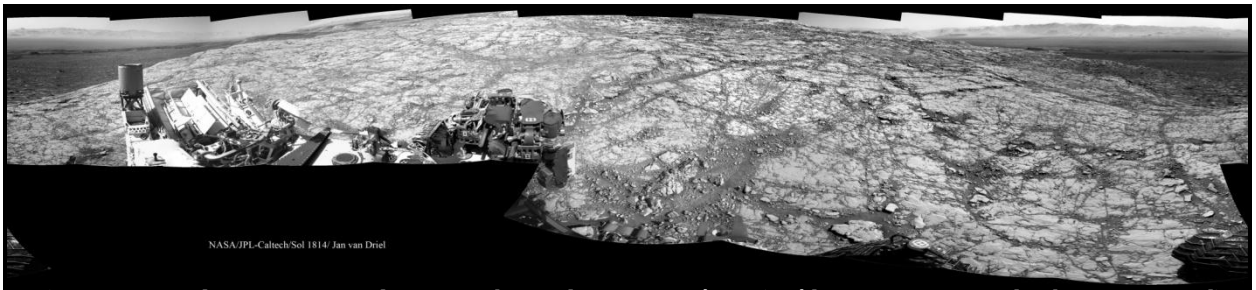


Figure 177 : Sol 1814, sommet de Vera Rubin Ridge, 11,87 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

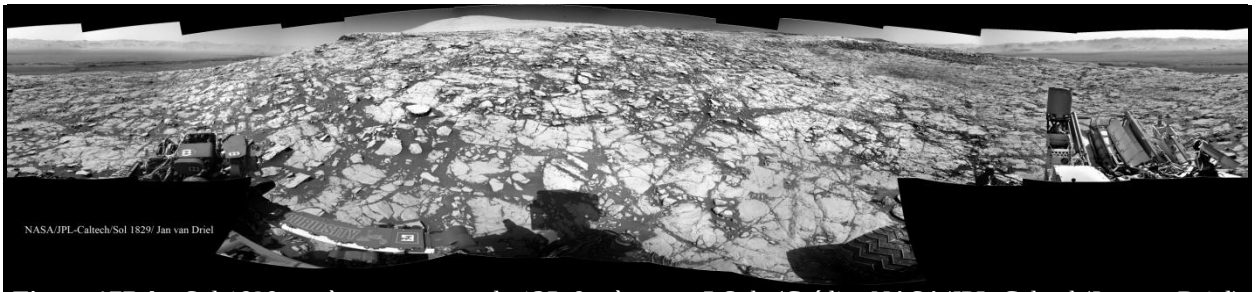


Figure 177 A : Sol 1829, après un parcours de 135, 9 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

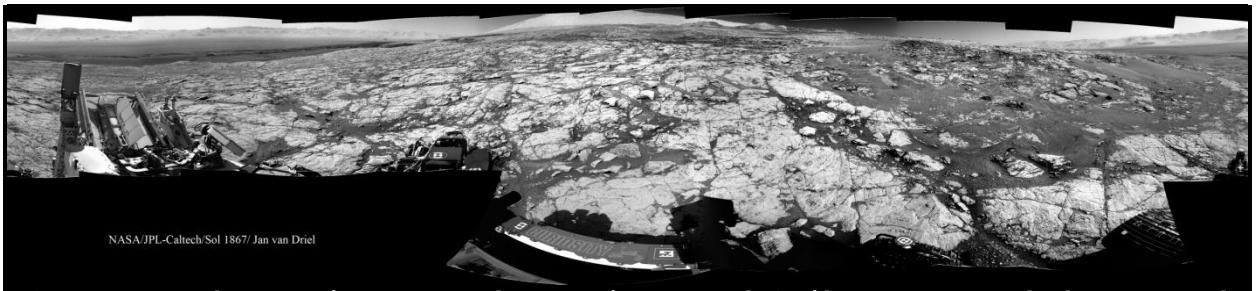


Figure 177 B : Sol 1867, après un parcours de 158,5 mètres en 8 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

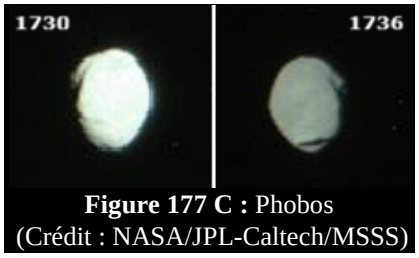


Figure 177 C : Phobos (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

près de 200 mètres de largeur (Figure 171). Dix jours plus tard durant le trajet vers le sud-est, le rover franchis le cap de son seizième kilomètre parcourus à la surface de Mars le 17 avril 2017 (Sol 1669). Sur les Sols 1730 et 1736 lors de séance d'observations astronomiques planifiées, l'astromobile photographie le transit de la lune Phodos qui passe au-dessus de l'horizon (Figure 177 C). Dix-huit Sols plus tard en contournant un petit champ de dune situé au nord de la crête « Vera Rubin Ridge », le rover franchit le cap de son dix-septième kilomètre parcourus à la surface de la planète rouge le 13 juillet 2017.

Figure 178 : Sol 1903, après un parcours de 214,8 m en 10 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

Figure 178 B : Sol 1930, après un parcours de 118 m en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

Stationné à la hauteur de « Ogunquit Beach » au sud de « Ireson Hill » (Figure 175), l'astromobile se prépare à passer à travers la troisième conjonction solaire d'une durée de deux semaines en mode automatique, et qui arrivera neuf jours plus tard entre les Sols 1763 et 1772 (du 22 juillet au 1er août 2017). Le robot aura parcourus avec prudence une distance de plus de 1 539,47 mètres effectuée en 44 séances de conduite quotidienne entre les Sols 1690 et 1802 (du 8 mai au 31 août 2017) (Figure 175:C-D-E et Figure 176). Un long trajet qui a été effectué en trois mois et deux semaines sur un terrain constituée de gros blocs rocheux et des dunes sablonneuses qui représentent des obstacles qu'il faut contourner, et qui correspond à la traversée de toute la zone stratigraphique de la formation Blunts Point. Après avoir fêté son cinquième anniversaire à la surface de Mars le 6 août 2017 (Sol 1777), l'astromobile arrive enfin à la base du versant nord de la crête « Vera Rubin Ridge » au Sol 1802 le 31 août 2017. Une semaine plus tard au Sol 1809, Curiosity amorce l'acensions des pentes de 16 à 20 degrés pour atteindre le sommet qui se trouve 21 mètres plus haut, et rejoint du même coût le terrain faisant partie de la zone stratigraphique de la formation Pettegrove Point, qui présente une forte signature spectrale d'hématite cristalline rouge.

Durant la traversée du sommet de « Vera Rubin Ridge », la première expérience de chimie humide de dérivatisation utilisant du MTBSTFA effectué par l'instrument SAM – c'est-à-dire qu'elles réagissent d'abord avec d'autres produits chimiques pour devenir plus volatiles, est programmée pour une séance d'analyse de nuit sur un échantillon de sable provenant de « Ogunquit Beach ». Une dune active dont les grains ont été exposés aux rayons UV et qui a été conservé dans le rover depuis ça récolte au Sol 1651[19]. Le mélange a été chauffé à environ 60-100°C pour favoriser la réaction chimique entre le liquide et le sable. L'objectif est de détecter de grosses molécules organiques et d'évaluer la teneur et les sources de composés volatils contenus dans le matériau éolien du cratère « Gale ». Jusqu'à présent, SAM n'a réalisé que des expériences EGA à sec, qui consistait à chauffer par palier des échantillons solides pour éliminer les gaz et en mesurer la composition chimique. Une expérience de dérivatisation est un procédé chimique qui consiste à modifier une molécule pour la rendre volatiles plus facile à analyser, c'est une technique qui consiste à laisser réagir l'échantillon à l'intérieur de SAM avec du MTBSTFA jouant le rôle de réactif liquide (scellé dans sept coupelles) pour dissoudre les composés organiques. Le MTBSTFA dont le rôle est de remplacer les atomes d'hydrogène "mobiles" des molécules organiques, est capable de réagir avec de grosses molécules pour les transformer en molécules gazeuses à des températures plus basses sans combustion, de sorte qu'elles sont libérées plus facilement à l'intérieur de SAM pour y être ensuite mesurées par les différents spectromètres de l'instrument. Mais lors de l'acheminement de l'échantillon pour le déposer dans

[19] Curiosity finds organic molecules in Mars sand dune, 01 November 2021

Figure 178 C : Expérience LIBS (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

SAM, pour procéder à une analyse des gaz émis (EGA), l'opération a échouée à trois reprises (Sols 1839-1840, 1854 et 1858) pour des raisons différentes à chaque fois (une erreur de commande du SAM, une perte de liaison et un défaut thermique du bras dû à l'hiver et au froid). Au besoin si le foret venait à se briser ou s'il devenait trop usé, ou encore s'il restait coincé dans une roche, Curiosity en possédait deux autres pour le remplacer stockés dans une boîte situé à l'avant du rover. L'opération de transfère est finalement exécutée au Sol 1862 (1er novembre 2017), et l'expérience de chimie humide de dérivatisation de SAM est finalement conduite un mois et trois semaines plus tard sur le Sol 1909 le 19 décembre 2017.

Entre temps sur le Sol 1906, le laser de ChemCam à mener plusieurs expérience LIBS sur des cible de roches différentes, et pour illustrer voici une séance de tirs laser qui a été effectué sur un alignement de dix troues de plusieurs dizaine d'impulsion laser chacun (Figure 178:C), image du micro imager MAHLI). Les analyses ont permis de faire la découverte de certains composés organiques comme l'ammoniac (NH_3), l'acide benzoïque ($C_6H_5CO_2H$), l'acide phosphorique (H_3PO_4) et le phénol (C_6H_6O). L'instrument SAM est composé d'un spectromètre de masse quadripolaire (QMS), qui envoie des électrons à grande vitesse pour génère des molécules chargées qui seront ensuite détectés en fonction de leur rapport masse/charge, d'un chromatographe en phase gazeuse (GC) à six colonnes et d'un spectromètre laser accordable (TLS) couplés à des systèmes de traitement d'échantillons solides et gazeux, dont deux fours à pyrolyse. Le mini laboratoire SAM peut exécuter trois types d'expériences (sec ou EGA, et deux de type humide MTBSTFA/TMAH), et chaque type peut-être étudiées par trois modes d'analyse différents pouvant être combinées entre eux. Soit le mode EGA (analyse des gaz émis), les échantillons sont chauffés et les composés volatils dégagés sont mesurés directement par le QMS. Le mode GC-MS utilisé pour analyser les gaz organiques et inorganiques dégagés lors du chauffage des échantillons. Tandis que le mode d'analyse TLS est utilisé pour mesurer les quantités et la composition isotopique des gaz H_2O, CO_2 et CH_4 dégagés lors de la pyrolyse.

L'astromobile explore le sommet de la crête « Vera Rubin Ridge » durant les trois semaines suivant (Figure 176:A, 177 et 178), puis l'astromobile franchit le cap de son dix-huitième kilomètre parcourus à la surface de la planète rouge au Sol 1930 le 10 janvier 2018 (Figure 178:B). Le rover Curiosity atteint l'extrémité sud de la crête « Vera Rubin Ridge » au Sol 1942 le 22 janvier 2018, offrant une magnifique vue plongeante sur la vallée argileuse « Glen Torridon ». Le 24 janvier 2018 (Sol 1944) le robot rebrousse chemin en remontant vers le nord-est, afin de poursuivre l'étude de « Vera Rubin Ridge » en faisant la recherche de zones riches en hématite pour y effectuer différents campagnes de forages. Le 23 mars, après avoir effectués deux tentatives de forages qui ont échoués à « Lake Orcadie » (Sol 1977 et 1983) (Figure 183:Aa), Curiosity atteint son 2000ème Sol à explorer la surface de la planète Mars, et six jours plus tard le 29 mars 2018 (Sol 2006) l'astromobile fête sa troisième année d'exploration en temps martiens. Depuis le 7 mai 2018 au Sol 2044 ou le robot a franchit le cap de son dix-neuvième kilomètre, le rover commence à se diriger vers le nord-est pour rechercher une zone de forage plus tendre pouvant se trouver dans la couche géologique de la formation Murray situé à la base du flanc nord de la crête de « Vera Rubin Ridge ». Le but est également de tester la nouvelle

procédure algorithmique de forage et de livraison d'échantillons appelée FEDuP (Feed Extended Drilling using Percussion) sur une roche réputée plus tendre que celle constituée majoritairement d'hématite de la crête « Vera Rubin Ridge », dont deux tentatives utilisant uniquement la technique de forage en mode rotatif ont déjà échouées à « Lake Orcadie »[20].

Figure 179 : Foreuse et Askival (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

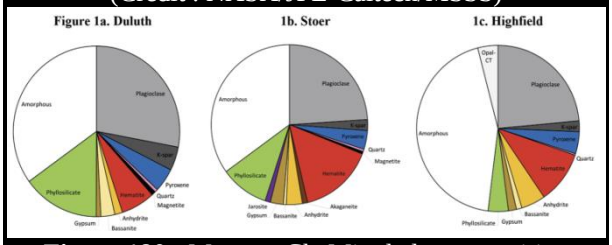


Figure 180 : Mesures CheMin de la composition minérale des forages faits sur la crête Vera Rubin. Morris et al. (2019)

L'astromobile Curiosity qui n'est plus en mesure de forer depuis le 2 décembre 2016 (Sol 1537), à cause de l'échec survenue lors de la tentative de forage exécuté à « Precipice » suite à une panne d'alimentation, soit six semaines après la campagne de forage effectuée à « Sebina » au Sol 1495. La panne d'alimentation avait été causée par un court circuit originaire d'une bobine acoustique, qui utilise un champ magnétique pour contrôler le mouvement à haute fréquence du piston du système de percussion (Figure 179). Le frottement du piston contre les parois de la chambre lors de l'activation de la percussion a occasionnée une surtension qui a généré le court-circuit. Le moteur qui déplace le foret dans la roche ne fonctionne plus, et la perceuse doit désormais rester en position complètement déployée pour dégager le foret des stabilisateurs et de rester utilisable en cas de nouvelle défaillance du mécanisme d'alimentation. La nouvelle procédure (algorithme) de forage à alimentation prolongée Feed Extended Drilling (FEDuP), indique au rover de répondre en temps réel, et d'utiliser uniquement la rotation du foret assisté du nouveau logiciel de percussion ajustable avec le mouvement du bras robotique qui utilise son poids pour pousser et enfoncer le foret selon la dureté de la roche. Ne pouvant plus également rétracter l'ensemble du système de forage, par peur de la survenus d'un nouveau court circuit pouvant rendre inutilisables les instruments SAM et CheMin pour le reste de la mission. Une nouvelle procédure de livraison d'échantillons à alimentation prolongée (FESTest) est également testée pour contourner le schéma de livraison directe via CHIMRA. La contraction du mécanisme de forage servait à aligner le bec verseur situé à la sortie du réservoir d'échantillonnage avec l'entonnoir d'entrée de l'instrument de traitement, de tamisage et de dosage des échantillons de CHIMRA. Le foret sera désormais placer directement au dessus des trappes après vérification de la grosseur des grains, puis via l'activation de la rotation inversée du foret une partie de l'échantillon de poudre de roche sera déversée dans l'entrées des trappes des labos SAM et CheMin. Les nouvelles procédures de forage et de transfert à alimentation prolongée ont été testées pour la première fois à « Lake Orcadie » sur le Sol 1977. La cible de roche dénommée « Askival » (Figure 179:B), identifié dans l'espace de travail « Bressay » (Sols 2018-2020), a fournit une première vision de l'histoire de l'altération aqueuse de roches feldspathiques martiennes et qui ont considérablement modifié sa minéralogie d'origine.

[20] Evidence for a Diagenetic Origin of Vera Rubin Ridge, Gale Crater, Mars: Summary and Synthesis of Curiosity's Exploration Campaign (27 juin 2022)

Figure 181 : Progression de l'opacité atmosphérique de 8 au 18 juin 2018 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

Après 1 an et 7 mois (562 Sols) incluant plusieurs testes pour trouver une nouvelle procédure de forage. Le seizième forage de la mission est finalement réalisé le 20 mai 2018 (Sol 2057), sur un gros bloc de roche finement laminées du membre géologique Blunt's Point de la formation Murray dénommée « Duluth » (Figure 183:Ba) creusé sur 55 millimètres de profondeur. Les analyses effectuées par les instruments SAM et CheMin nécessitent chacune une puissance électrique significative, ils ne peuvent donc plus être programmée sur la même plage horaire quotidienne et ils sont généralement effectué de nuit. Le labo CheMin reçoit un échantillon à analyser au Sol 2057 et SAM le 22 mai 2018 (Sol 2059), dont les mesures serviront à améliorer la précision des données acquises sur les mesures de diffraction à rayons X (Figure 180). Une nouvelle saison de tempêtes de poussière globale débute sur la face opposée de Mars près du site d'atterrissage du rover Opportunity entre le 30 mai et la fin août 2018 (Figure 181), cette dernière sonnera la fin de la mission d'Opportunity sur Mars le 10 juin 2018 sur le Sol 5111 de sa mission. La saison des tempêtes de poussière sur Mars commence juste après le passage du périhélie. Bien que la progression du facteur Tau, qui mesure l'indice de l'opacité atmosphérique, est plus modéré dans la région du cratère « Gale » que celui du cratère « Endeavour ». Les données recueillis le 12 juin 2018 (Sol 2079) indiquent une valeur située entre 2 et 3 contrairement à 10,8 mesuré le 10 juin 2018 dans le cratère « Endeavour » (Figure 181).

Figure 182 : Sol 2137 Stoer (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

Curiosity fête sa sixième année sur Mars le 6 août 2018 (Sol 2133), et après quatre échecs de forage sur la roche dure de la crête d'hématite « Vera Rubin Ridge » (« Lac Orcadie 1 et 2 », « Voyageurs » et « Ailsa Craig ») (Figure 183:A), la tentative du forage effectué sur l'affleurement « Stoer » (Figure 182 et 183:Bb) réalisée le 9 août 2018 (Sol 2136) est une réussite (le 17ème). L'analyse minéralogique de CheMin sur le résidu de poudre de roche du forage « Stoer », a démontré que l'échantillon contenait la plus forte concentration d'hématite rencontré jusqu'à maintenant[21]. Les données suggèrent une histoire d'altération aqueuse complexe avec plusieurs épisodes de fluides variablement chauds, provenant par exemple de panaches géothermique ou à

[21] Mineralogy of Vera Rubin Ridge From the Mars Science Laboratory CheMin Instrument (24 June 2020)

Figure 183 a : Liste des forages échoués à Vera Rubin Ridge (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

des systèmes hydrothermaux, salins ou acides, son venues altéré alternativement les roches de la crête « Vera Rubin Ridge » plus solides et plus résistantes à l'érosion que les roches du terrain environnant au cours de plusieurs épisodes, dont la concentration en phyllosilicates est relativement faibles par rapport aux unités environnantes. Par rapport au profile d'élévation du site d'atterrissage « Bradbury Landing », l'astromobile a grimpé de 326 mètres plus haut à travers son ascension des pentes du mont « Sharp ».

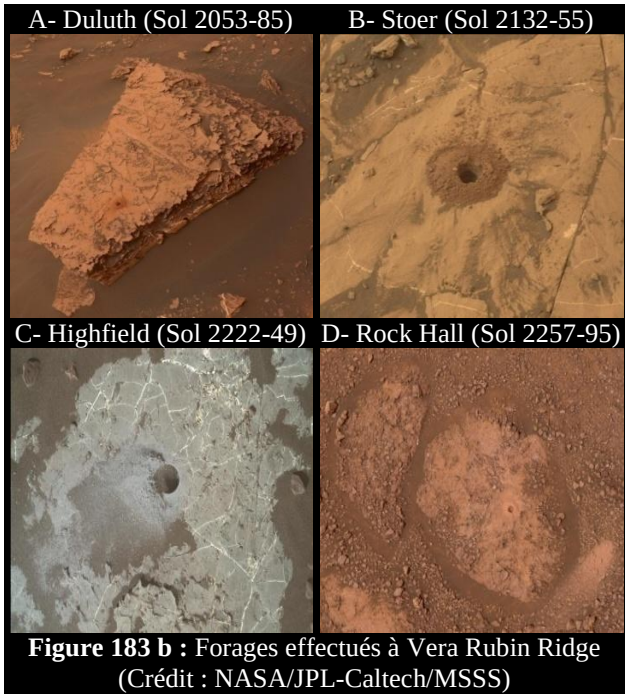


Figure 183 b : Forages effectués à Vera Rubin Ridge (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

À partir du Sol 2156, le rover se déplace vers le sud à la recherche de future site de forage pour échantillonner le sommet de la crête « Vera Rubin Ridge » sur toute sa largeur. Depuis le 15 septembre 2018 (Sol 2172), l'astromobile rencontre des difficultés a accédés à la mémoire flash de l'ordinateur B. Il s'agit du même problème rencontré par l'ordinateur A le 27 février 2013 au Sol 200, soit 7 mois après son atterrissage avant le transfère des commandes sur l'ordinateur B. Après 18 jours de silence le 3 octobre 2018 (Sol 2191), le contrôle du rover est redirigé vers le système informatique de l'ordinateur A, le temps de trouver une solution au problème rencontré et à la sauvegarde des données. Curiosity égalise la durée opérationnelle de la mission du rover Spirit sur Mars le 22 octobre 2018 au Sol 2210. Après un cinquième échec lors de la tentative de forage effectué sur la roche dure dénommée « Inverness » au Sol 2170 le 13 septembre 2018 (Figure 183:Ad). Le dix-huitième forage de la mission est finalement exécuté le 8 novembre 2018 au Sol 2224 sur la cible « Highfield » (Sols 2222-49) (Figure 183:Bc), dont l'échantillon s'est révélé être enrichie en carbone 12. Il s'agit d'un paver d'affleurement dont la surface est rayée de petites veinules de gypse blanc situé à proximité des cibles « Lac Orcadie 1 et 2 ». La détection d'hématite grise dans l'échantillon « Highfield » est la preuve la plus solide de la présence d'un fluide chaud, car elle se forme généralement qu'à partir d'une altération comprise entre 100 et 200 °C.

Un grand événement s'est produit le 26 novembre 2018 (Sol 2240), la sonde InSight consacrée à l'étude de la structure interne de la planète Mars (mission traitée dans le tome 2) à atterri avec succès dans « Elysium Planitia » situé à 600 km au nord du cratère « Gale ». Le 19ème forage est exécuté le 16 décembre 2018 au Sol 2261 sur la cible « Roch Hall » (Sols 2257-95), et

Aberlady et Kilmarie

Figure 184 : Autoportrait composé de 57 images individuelles (MAHLI) effectué près des forages Aberlady et Kilmarie au Sol 2405 le 12 mai 2019 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

l'exercice a atteint la profondeur maximale dès le premier essai (Figure 183:Bd). Contrairement à « Highfield, « Rock Hall » a libéré de l'oxygène, confirmant la présence de sels de chlore oxydants (perchlorates). Le rover quitte définitivement « Vera Rubin Ridge » au Sol 2300 après avoir passé plus de 18 mois à explorer la crête d'hématite (depuis le Sol 1812). Le but est de reprendre la route à travers la vallée argileuse « Glen Torridon » (dépôts riche en argile smectites et en sulfate de calcium datant de -3,4 à 3,7 milliards d'année), qui s'étend jusqu'aux premières mesas (butte) situé au pied du mont « Sharp ». Curiosity descend la pente du flanc sud de « Vera Rubin Ridge » et rejoint finalement « Glen Torridon » (formation Carolyn Shoemaker) au Sol 2300 le 25 janvier 2019, et franchit le même jour la barre des 20 kilomètre parcourus sur la planète Mars. Le 6 mars 2019 au Sol 2339, l'ordinateur A s'est encore réinitialisé intempestivement et a déclenché le "mode sans échec" du système, c'était la deuxième réinitialisation de l'ordinateur en trois semaines. Le diagnostique de la mémoire de l'ordinateur B a permis d'isoler les zones mémoires corrompues avec un reformatage du système réussi, et la décision fut donc prise de rebasculer le rover de l'ordinateur A sur l'ordinateur B. Le 7 avril 2019 au Sol 2370, Curiosity qui roule à présent dans la vallée argileuse « Glen Torridon » (membre Jura de la formation Caroline Shoemaker) en longeant le flanc sud de l'escarpement « Vera Rubin Ridge », réussi a effectué son 20ème forage sur la cible « Aberlady » (Sols 2365-80) en utilisant seulement la rotation sans percussion (mouvement de martèlement) (Figure 184). La roche s'est fracturée sous l'action de la foreuse, un doute sur la quantité de poudre collectée a conduit l'équipe à rejeter l'échantillon. Deux semaines plus tard le 21 avril 2019 au Sol 2384, le rover réalise le 21ème forage de la mission sur la cible de surface « Kilmarie » (Sols 2381-2408), qui se trouve sur un autre pavé d'affleurement tendres et très friable située à seulement 80 cm à droite du forage précédent (Figure 184). Deux séances d'analyse EGA de SAM sont programmée aux Sols 2393 et 2398, pour effectuer une expérience de pyrolyse. La détection de la sidérite ($FeCO_3$), un minéral de carbonate de fer, est confirmée pour la premièere fois. La sidérite résout'elle l'énigme de la perte du dioxyde de carbone de l'ancienne atmosphère épaisse de Mars. La présence de sidérite prouve qu'une partie du carbone a été piégée et stocker dans la croûte martienne sous forme de minéraux. Les scientifiques soupçonnaient depuis longtemps que les minéraux carbonatés comme la sidérite se formaient par dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau liquide d'anciens lacs. Cela confirme que Mars possédait autrefois des environnements habitables. Les analyses des échantillons récoltés dans les deux derniers forages, ont révélé les plus grandes quantités de minéraux argileux jamais trouvées au cours de la mission jusqu'à maintenant (30 %).

Après avoir roulé vers le sud depuis le Sol 2429, trajet durant lequel Curiosity franchi le cap de son 21ème kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars le 22 juillet 2019 (Sol 2473). Le robot effectue son 22ème forage sur un terrain faisant partie de la formation Carolyn

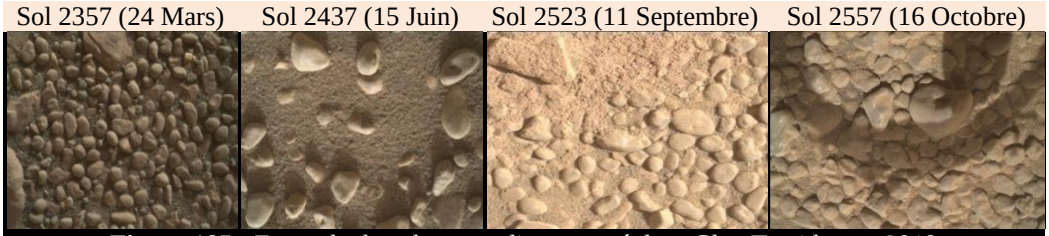


Figure 185 : Exemple de galet arrondi rencontré dans Glen Torridon en 2019 (Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 186 : Glen Etive 1 et 2 (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Shoemaker[22] (qui marque une transition des conditions lacustres vers des conditions fluvio-lacustre) le 4 août au Sol 2486 sur la cible « Glen Etive 1 » (Sols 2484-2524), que l'astromobile va étudier par la suite durant les quarante prochain Sol (Figure 186). Et deux jours plus tard le 6 août 2019 au Sol 2488, le rover qui démontre une longévité de fonctionnement remarquable fête sa septième année d'exploration martienne. Un deuxième forage sera nécessaires pour obtenir suffisamment de matériel d'échantillon pour effectuées les expériences CheMin et SAM. L'échantillon provenant de « Glen Etive 1 » contient la plus grande abondance de minéraux argileux analysée par CheMin jusqu'à présent dans le cratère « Gale » (34 % en poids). L'échantillon de « Glen Etive 1 » servira donc de "témoin" pour l'analyse de chimie humide qui sera exécuté plus tard sur la cible « Glen Etive 2 » (où un réactif chimique a été ajouté). En comparant les résultats obtenues il sera possible d'identifier quelles molécules étaient natives de Mars et lesquelles résultaient des réactions chimiques à l'intérieur du four. Il est temps maintenant de préparer le rover à une pause bligatoire d'une durée de deux semaines, afin de passer en mode automatique à travers le black-out total des communications radio durant la quatrième conjonction solaire prévue entre les Sols 2509 et 2522 (du 28 août au 10 septembre 2019).

Une semaine après la sortie de la conjonction solaire, Curiosity effectue la 23ème campagne de forage sur la cible « Glen Etive 2 » (Sols 2525-55) le 15 septembre 2019 au Sol 2527, creusant un trou d'environ 43 mm de profondeur (Figure 186). La séance de forage s'est effectuée sur le même pavé d'affleurement à une vingtaine de centimètre au nord-est que le forage précédent. En excluant les forages de test, il s'agit de la première série de forage double de la mission ou deux forages sont creusés l'un près de l'autre sur la même cible de roche. Il s'agit également de la troisième série de campagne de forage double qui est exécuté dans la même zone

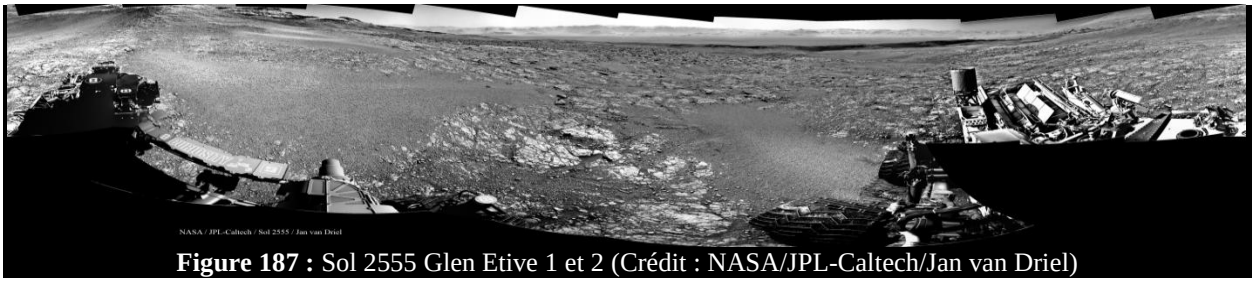


Figure 187 : Sol 2555 Glen Etive 1 et 2 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

[22] Geology and Stratigraphic Correlation of the Murray and Carolyn Shoemaker Formations Across the Glen Torridon Region, Gale Crater, Mars (12 September 2022)

Figure 188 : Sol 2687, Hutton (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Thomas Appéré)

de travail, mais sur des cibles de roches différentes. La première série "John Klein/Cumberlant" a été exécuté à « Yellow Knife Bay » (« Glenelg »), et la deuxième série "Aberlady/Kilmarie" a été effectuée au pied du flanc sud de « Vera Rubin Ridge ». L'instrument SAM dédié à l'analyse de la matière organique plus complexe, va utiliser pour la deuxième fois l'une des coupelles métallique destinées aux expériences spéciale de chimie humide à basse température (75–300 °C) avec le réactif liquide MTBSTFA[23], pour amorcer une expérience qui sera exécutée durant la nuit entre les Sols 2540 à 2542 (du 29 septembre au 1er octobre 2019) sur un échantillon provenant de « Glen Etive 2 ». Un nouveau et très long protocole d'analyse a été mis au point permettant de contourner l'action destructrice des perchlorates sur les molécules organiques originelle en les transformant en chlorohydrocarbones lors du processus de chauffage, rendant ainsi impossible l'identification des molécules organique originelle. SAM a détecté la plus grande diversité de molécules organiques complexes (soufrées, azotées) de la famille des acides carboxyliques aromatiques, comme l'acide benzoïque ($C_7H_6O_2$) qui est confirmé pour la première fois. Après deux mois et demi de presque immobilité (Sols 2481-2555), le rover Curiosity reprend la route vers le sud en direction de « Central Butte » au Sol 2555 le 14 octobre 2019 (Figure 187).

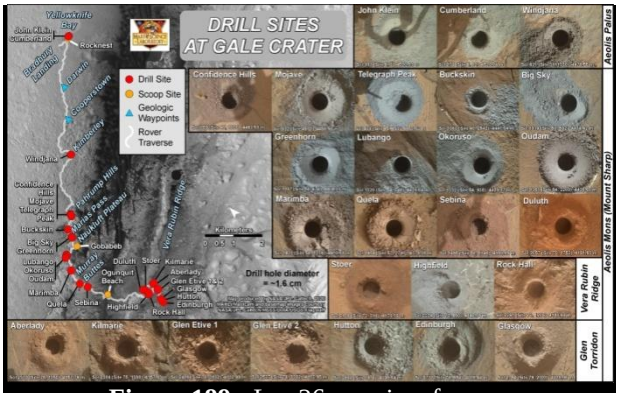


Figure 189 : Les 26 premiers forages (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Après avoir parcourus une distance de plus de 151,58 mètres en six séances de roulement quotidien entre les Sols 2555 et 2568. Le robot explore les environs des petites collines « Central Butte » (~4 mètres de haut) et de « Western Butte » (~9 mètres de haut) durant un peut plus de deux mois et demi entre les Sols 2569 et 2653. Curiosity se remet en route vers le sud au Sol 2654 le 24 janvier 2020, pour rouler en direction de « Tower Butte » (~11 mètres de haut) et des parois surélevé de près de 12 mètres de hauteur du fronton « Greenheugh Pediment ». Une semaine plus tard au Sol 2668 le 7 février 2020 (Figure 188 et 190:A), l'astromobile exécute le 24ème forage sur la cible baptisé « Hutton » (Sols 2664-90). Le robot entame un nouveau selfie composé de 86 images individuelles prises par la caméra MAHLI

[23] Sedimentary Organics in Glen Torridon, Gale Crater, Mars: Results From the SAM Instrument Suite and Supporting Laboratory Analyses (12 September 2022)

Figure 190 : Hutton, Edinburgh et Glasgow (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

située à l'extrémité du bras robotique, et qui ont été assemblées pour former le panorama. Vers le centre de la partie gauche de la figure 188 on peut voir au loin la colline « Western Butte », suivit à droite vers le centre de l'image de « Tower Butte » et derrière le rover on retrouve l'escarpement rocheux faisant partie du fronton « Greenheugh Pediment ». La zone de travail de la 24ème campagne de forage effectué à « Hutton » est également visible dans la partie inférieure au centre de l'image sur le pavé d'affleurement situé devant Curiosity. Une séance d'analyse EGA de l'instrument SAM est programmée deux semaines plus tard sur le Sol 2682 le 21 février 2020, dans l'objectif d'effectuer une expérience de pyrolyse sur une partie de l'échantillon de poudre de roche recueillis à « Hutton ». Après avoir monté au sommet du fronton « Greenheugh Pediment », ou Curiosity a atteint une inclinaison maximale de 32°, le robot effectue la 25ème campagne de forage sur la cible dénommée « Edinburgh » (Sols 2702-28) le 22 mars 2020 au Sol 2711 (Figure 190:B). L'expérience EGA de SAM (Sol 2721) a détecté des pics correspondant à des sulfates de magnésium ($MgSO_4$) et de fer ($FeSO_4$). Ces sels témoignent de phases d'évaporation ou d'interactions avec des fluides salins. L'astromobile fait ensuite demi-tour le 13 avril (Sol 2732), dans le but de descendre du fronton et de se déplacer à nouveau à travers la vallée argileuse « Glen Torridon » pour y rechercher de nouvelles zones d'échantillonnages et de forage.

Le rover franchis le cap de son 22ème kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars le 23 avril au Sol 2742, et le 26ème forage est exécuté sur la cible « Glasgow » (Sols 2747-79) au Sol 2754 le 5 mai 2020 (Figure 190:C). Il s'agit de la sixième campagne de forage effectué pour échantillonner la zone argileuse « Glen Torridon » (Figure 189). Deux séances d'analyse EGA de l'instrument SAM sont programmées entre les Sols 2765 et 2771 pour effectuer des expériences de pyrolyse sur une partie de l'échantillon recueillis à « Glasgow ». Les analyses de pyrolyse de SAM (GC-MS) effectué à « Glen Etive 1 et 2 » (la plus grande abondance de minéraux argileux), « Glasgow » et « Hutton », ont conduit à la détection de la plus grande abondance et diversité de molécules organiques soufrées détectées jusqu'à présent dans le cratère « Gale ». À partir du Sol 2780, le rover poursuit sa randonnée vers l'est tout en étudiant le substratum rocheux et l'environnement locaux en cours de route, incluant une pause de deux jours pour étudier les environ de la butte « Bloodstone Hill » (Sols 2797-99). Le but rechercher est de contourner le vaste champ de dune de sable noir « Sands of Forvie » (Figure 192), qui borde la base de tout le flanc nord-est du fronton « Greenheugh Pediment », afin de rejoindre le point d'entrée de l'unité porteuse des sulfates (zone de transition argile-sulfate) située à l'entrée du delta alluvial à la hauteur de la crête centrale « Gediz Vallis Ridge ». Curiosity réussi à parcourir un long trajet de 101,08 mètres le 9 juillet sur le Sol 2817, soit la quatorzième séance de roulement quotidienne supérieur au cent mètres. Une semaine plus tard le 16 juillet 2020 (Sol 2824), le rover franchis le cap de son 23ème kilomètre parcourus depuis son atterrissage sur Mars.

L'avant dernière série de campagne de forage effectué dans la vallée argileuse de « Glen

Figure 191 : Mary Anning et Groken (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Torridon » faisant partie du membre Knockfarrill Hill de la formation Carolyn Shoemaker (datant d'environ 3,5 milliards d'années), débute avec le 27ème forage exécuté sur la cible « Mary Anning » (Sols 2829-54) qui se trouve sur l'affleurement « Mozie_Law » le 31 juillet 2020 au Sol 2838 (Figure 191). L'astromobile fête son huitième anniversaire une semaine plus tard le 6 août 2020 (Sol 2844). Une séance d'analyse EGA de l'instrument SAM est par la suite programmée sur le Sol 2850 le 12 août 2020, pour effectuer une expérience de pyrolyse. Dans une séquence standard, une coupelle en quartz vide est préconditionnée sous flux d'hélium dans le four de pyrolyse à environ 900 °C, puis refroidie à température ambiante avant l'introduction des portions d'échantillon dans la coupelle nettoyée. S'ensuit un chauffage par pyrolyse pour les analyses EGA et GC-MS. Mais vue de l'intérêt apporter par les annalyses des échantillons de poudre de roche récolté lors du dernier forage. La décision a été prise d'opérer un deuxième forage tout près du premier sur la même roche sédimentaire. Et un mois plus tard le 28ème forage est exécuté sur la cible « Mary Anning 3 » (Sols 2866-2904) le 2 septembre 2020 au Sol 2870 (Figure 191). Il s'agit de la deuxième campagne de forage double à être exécuté sur la même roche ou affleurement rocheux. L'intérêt étant toujours grandissant, la décision fut prise de réaliser la troisième expérience de chimie humide avec l'instrument SAM le 10 septembre 2020 au soir (Sol 2878), utilisant pour la première fois le réactif chimique TMAH (thermochimiolyse) fortement alcalin (pH 12) avec du méthanol, expérience qui permet entre autre à la libération des acides gras liés dans des macromolécules. Le rover a déposé six portions dans la coupelle, qui a ensuite été déplacée et scellée dans le four de pyrolyse n°1 de SAM. Parmi les 9 coupelles métalliques destinées aux expériences de chimie humide de SAM, 7 coupelles sont équipées du réactif liquide répondant au nom de N-méthyl-N-tert-butyldiméthylsilyltrifluoroacétamide (dérivatisation MTBSTFA), et les 2 autres avec le réactif d'hydroxyde de tétraméthylammonium (TMAH). Ces substances réagissent avec les molécules organiques pour formées de nouvelles substances qui sont plus faciles à transformer en gaz et plus résistantes à la chaleur et à mieu résister à l'oxydation des perchlorates. Cela rend le composé organique plus susceptible de survivre au chauffage et d'entrer dans une phase gazeuse qui passera pour analyse à travers le chromatographe en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) de SAM. Une deuxième expérience de chimie humide utilisant cette fois-ci le réactif de dérivatisation MTBSTFA est programmé au Sol 2885 le 17 septembre 2020, pour faire une analyse plus aprofondit de l'échantillon de poudre de roche provenant du forage exécuté sur la cible « Mary Anning 3 ».

Les expériences de chimie humide visaient des roches riches en argile dans la région de « Glen Torridon », et elles ont permis de détecter plus de 20 molécules organiques aromatiques et cycliques distinctes, dont des composés sulfurés complexes et des hétérocycles azotés (anneaux d'atomes de carbone contenant de l'azote, considérés comme des précurseurs de l'ADN et de l'ARN), et confirmant pour la première fois la présence de l'hydrocarbure aromatique polycyclique naphtalène ($C_{10}H_8$) et du composé organosulfuré benzothiophène ($C_6H_4C_2H_2S$). La détection du benzothiophène, une molécule contenant du carbone et du soufre qui a été trouvée dans de nombreuses météorites, aux côtés de thiophènes plus simples suggère que la matière organique martienne ressemble au kérogène terrestre (matière organique fossilisée que l'on trouve dans le charbon ou le pétrole). Sept d'entre eux ont été détectés pour la première fois, comme les hétérocycles azotés et l'acide carboxylique comme le benzoate de méthyle ($C_8H_8O_2$), qui posséde

à la fois un cycle aromatique (cycle benzénique) et un groupe ester. Renforçant les preuves que des molécules organiques complexes ont pu être préservées de l'exposition aux radiations sur Mars pendant des milliards d'années[24].

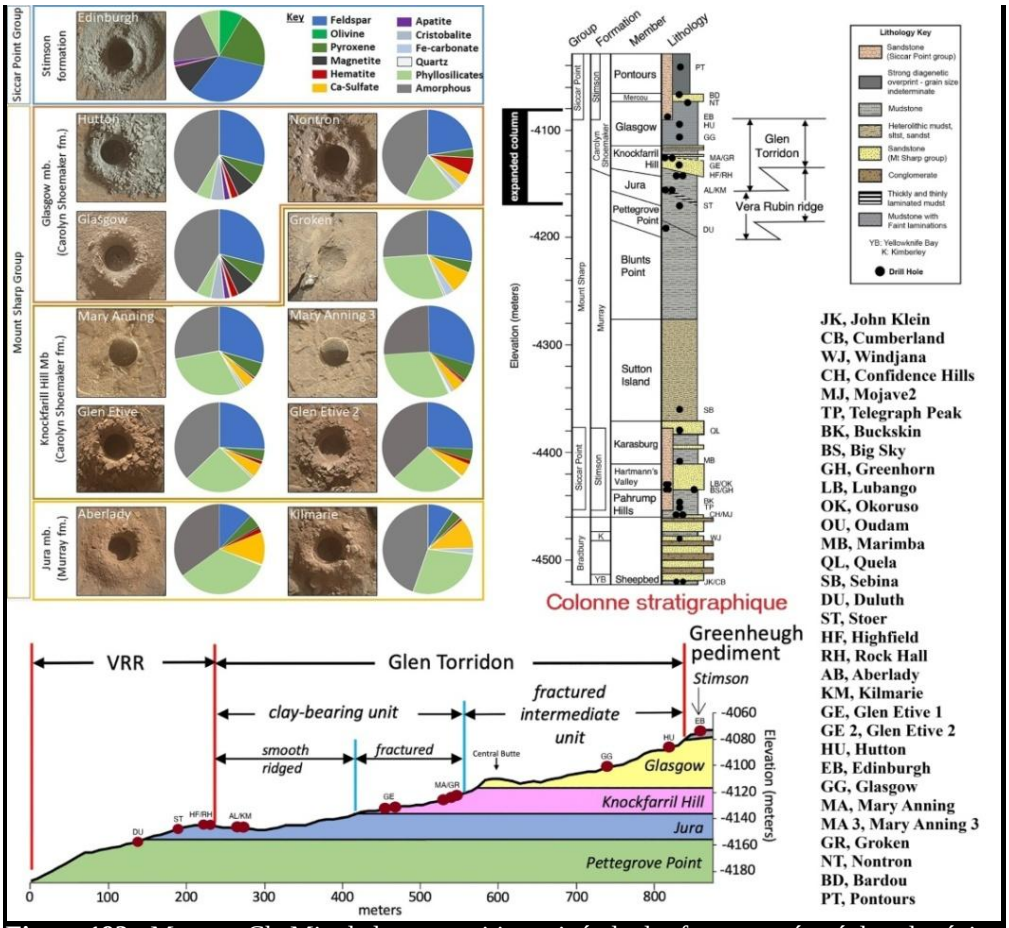


Figure 192 : Mesures CheMin de la composition minérale des forages exécuté dans la région de Glen Torridon (The Curiosity Rover's Exploration of Glen Torridon, Gale Crater, Mars: An Overview of the Campaign and Scientific Results 26 juin 2022)

Pour la première fois depuis le début de la mission de Curiosity sur Mars, une roche à eut droit à une série de trois campagnes de forage et d'échantillonnages complètes (Figure 191). Le 29ème forage a été exécuté à l'extrémité nord de l'affleurement rocheux « Mozie_Law » près des deux forages précédant, sur la cible dénommée « Groken » (Sols 2904-22) le 13 octobre 2020 au Sol 2910 (une roche riche en Mg). La roche dont la surface est parsemée de nodules sombres à cet endroit s'est fracturé dans sa partie supérieure lors du forage, un échantillon de poudre deroche est livré prioritairement au labo de minéralogie CheMin (Sol 2912) pour en déterminer la composition minéralogique. Une séance d'analyse EGA de l'instrument SAM est programmée huit jours plus tard sur le Sol 2918 le 21 octobre 2020, pour effectuer une expérience de pyrolyse. Après avoir passé plus de trois mois (Sols 2829-2922) à étudier la région de l'affleurement rocheux « Mozie_Law », l'astromobile reprend la route vers l'est le 26 octobre 2020 au Sol 2923 en direction de l'unité de sulfate qui se trouve à l'entrée de « Gediz Vallis ». Mais pour ce faire le

[24] Diverse organic molecules on Mars revealed by the first SAM TMAH experiment, Nature Communications : 21 April 2026

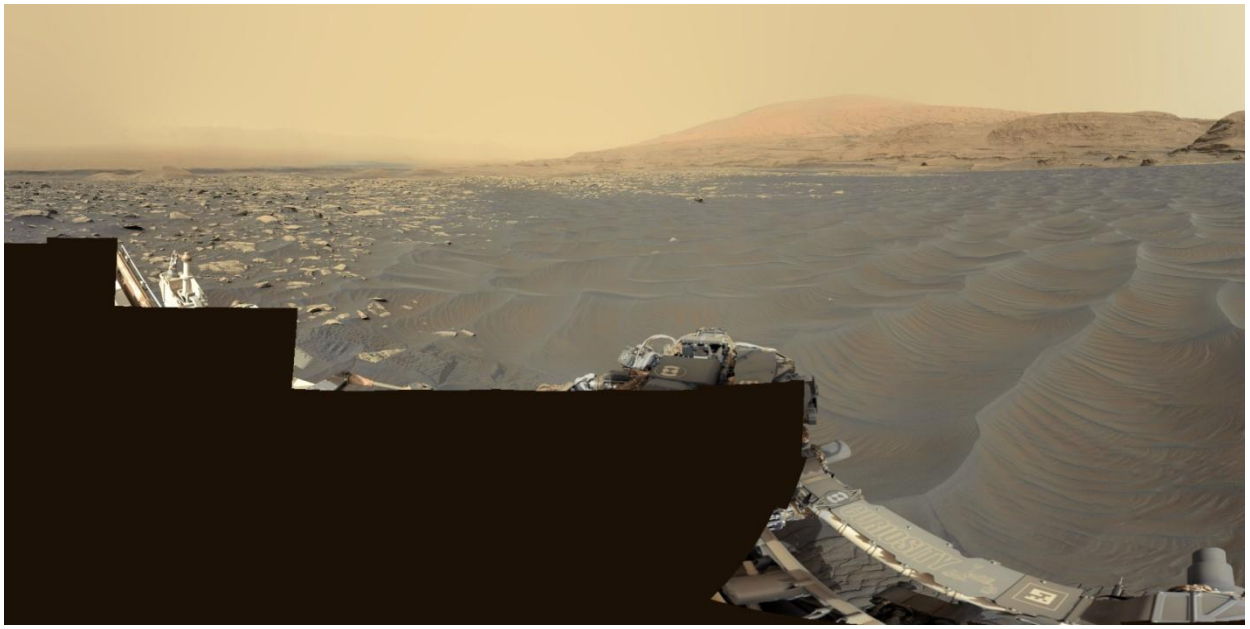


Figure 193 : Sol 2991, Sands of Forvie (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Elisabetta Bonora & Marco Faccin)

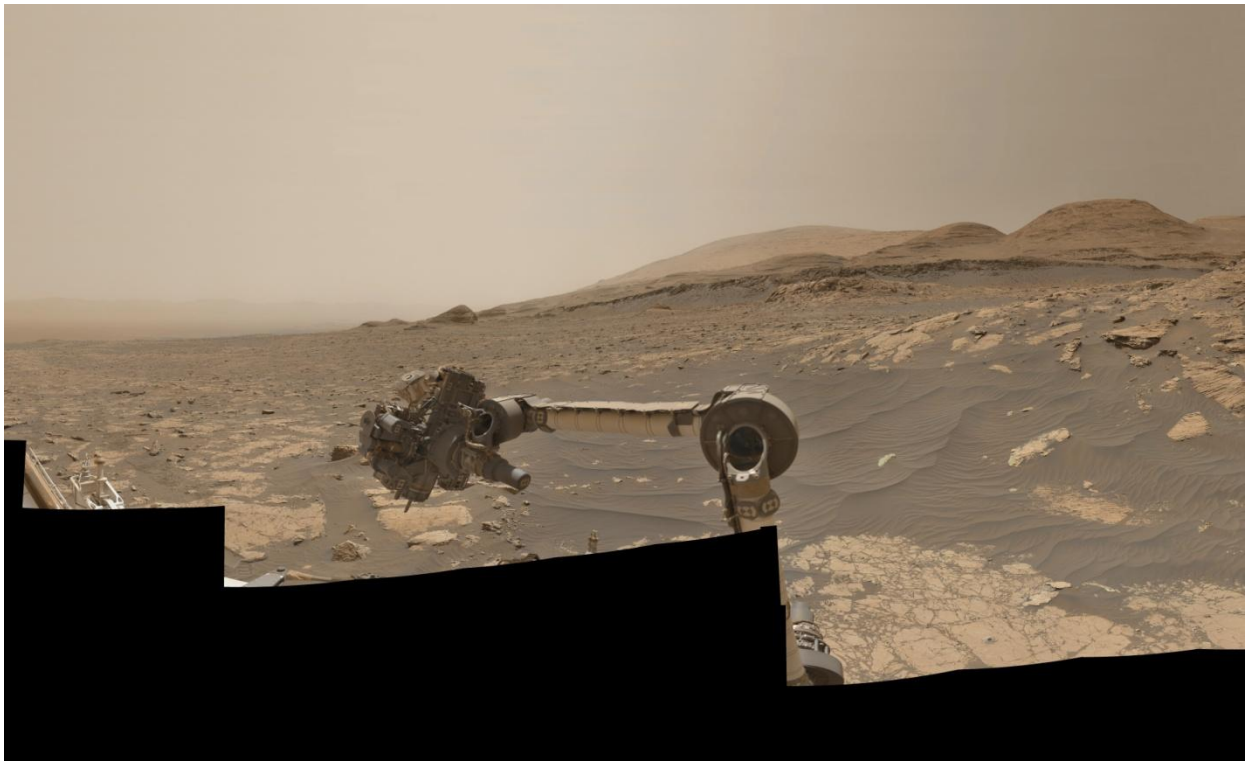


Figure 194 a : Sol 3060, Devant le Mont Mercou (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

rover doit contourner par le nord-est le vaste champ de dunes « Sands of Forvie » (Figure 193) situé aux pieds de « Greenheugh Pediment », et ensuite de faire demi tour et de revenir par le sud-ouest vers « Gediz Vallis », qui est la porte d'entrée de la grande vallée de débâcle conduisant à l'ascension vers le sommet du mont « Sharp ». La campagne de « Glen Torridon » (Figure 192) visait à caractériser la géologie de la région, à rechercher des preuves d'environnements habitables et à documenter le début d'une transition climatique potentiellement

Figure 193 : Suite Sol 2991 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Elisabetta Bonora & Marco Faccin)

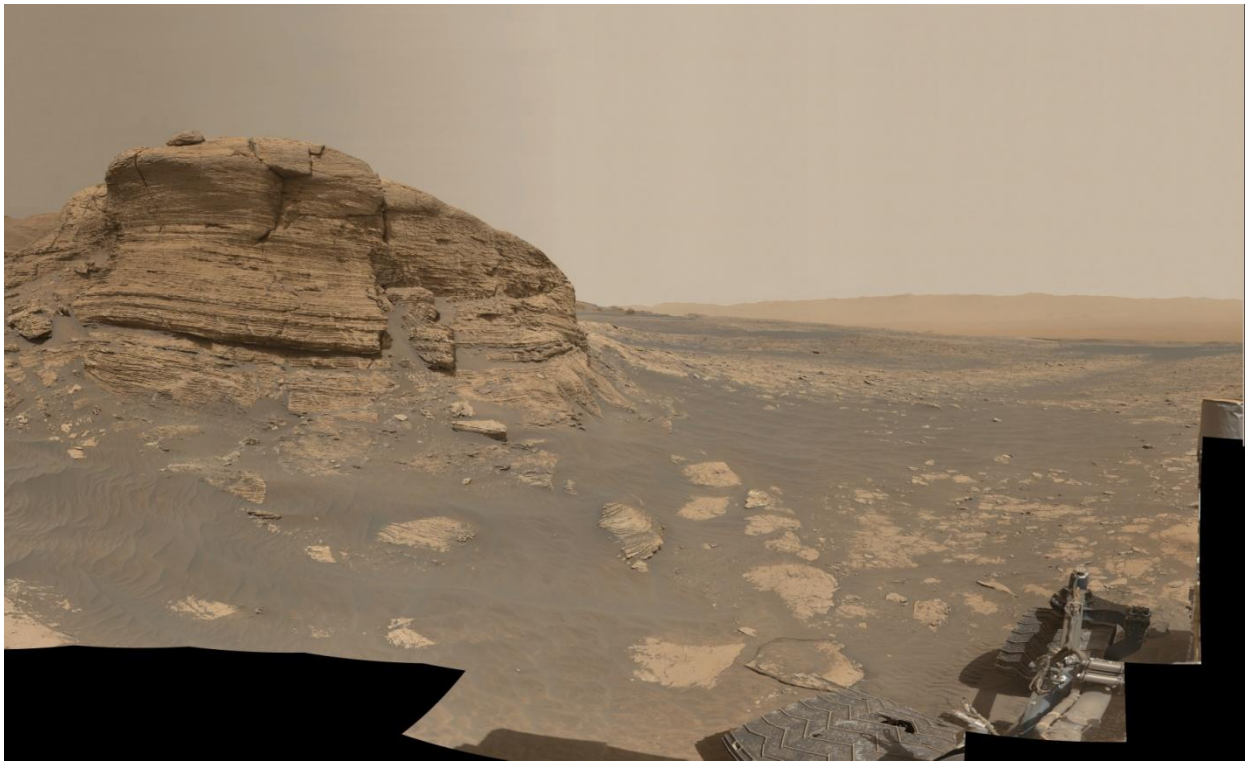


Figure 194 a : Suite Sol 3060 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

au cours de l'ère hespérienne[25]. « Glen Torridon » est un creux situé au sud-est de la crête « Vera Rubin Ridge » (VRR), qui chevauche sensiblement les signatures spectrales orbitales des phyllosilicates ou se trouve la formation Carolyn Shoemaker. Au cours de l'histoire géologique

[25] The Curiosity Rover's Exploration of Glen Torridon, Gale Crater, Mars: An Overview of the Campaign and Scientific Results (26 juin 2022)

du cratère « Gale », des cycles de sédimentation et d'érosion ont rempli et creusé le cratère à plusieurs reprises, laissant un long empilement d'enregistrement sédimentaire causé par l'action érosive de l'eau dans un environnement aqueux de surface et souterrains, comme des activités hydrothermalismes, transitant avec des conditions plus arides et sec soumis à l'action érosive et abrasif du vent et du sable fin sur de plus longue durée.

L'analyse de la complexité sédimentologique a abouti à la définition de trois groupes principale (Figure 192). Soit le groupe Bradbury (Sols 0-750) comprenant les formations Yellowknife Bay (Sols 126-303) et Kimberley (Sols 574-634) situé au fond de la cuvette du cratère, dont la traversé s'est effectué sur un trajet de plus de 9 kilomètres sur environ 40 mètres de dénivellation verticale. Il s'agit de l'unité stratigraphiquement la plus basse composé principalement de dépôts fluvio-deltaïques avec des intervalles de mudstone lacustres (argile et boue) et des conglomérats. Vient ensuite le groupe Mt. Sharp subdivisé en trois formations (Murray, Carolyn Shoemaker et Mirador) qui recouvre la base et les pentes du mont « Sharp » (« Aeolis Mons ») sur environ 400 mètres de dénivellation verticale. Il s'agit d'un groupe qui présente une plus grande altération chimique composé de grès à stratifications entrecroisées (sandstone) et de mudstone fluvio-lacustre très varié. Et pour finir nous retrouvons le groupe Siccar Point qui contient la formation Stimson, composée essentiellement de dépôts de grès éoliens basaltique plus résistantes à l'érosion et qui coiffe les discordances du groupe Mt. Sharp (« Emerson Plateau », « Naukluft Plateau », « Murray Buttes » et « Greenheugh Pediment ») (Figure 167:C). Il s'agit de la couche sédimentaire la plus récente qui a résisté à une érosion éolienne de très longue durée, et qui a participer à creusé le cratère et a libérer les couches sédimentaire qui était jadis enfouis plus profondément dans la cuvette. Les strates inférieures du groupe Mt. Sharp font partie de la formation Murray, principalement dominées par des dépôts lacustres de boue argileuse (mudstone) de lac ou de bordure de lac. La formation Murray est divisée en sept membres stratigraphiques (« Pahrump Hills », « Hartmann's Valley », « Karasburg », « Sutton Island », « Blunts Point », « Pettegrove » et une partie de « Jura ») basés sur des changements minéralogiques dominés par des mudstones finement laminés (eau calme) ponctués de dépôts de grès à grain plus ou moins grossier (sédimentation de dunes). La formation Murray d'une hauteur moyenne de plus de 400 mètres d'épaisseur, indique qu'un environnement lacustre et fluvio-lacustre était présent à différentes époques dans le cratère sur des périodes prolongées. La formation Stimson qui recouvre le groupe de discordance Siccar Point est la plus récente des couches sédimentaire, elle résulte de l'érosion éolienne et de l'altération aqueuse sur une couche de matériaux plus résistante qui a résisté au fil du temps. Les grès de la formation Stimson suggèrent que l'eau souterraine liquide était également présente jadis dans la cuvette du cratère à différentes époques, même parmi les plus récentes. L'unité suivant est occupée par la formation Carolyn Shoemaker riche en argile (smectite riche en Fe) qui recouvre la formation Murray à « Glen Torridon », elle marque une transition plus fluviale par rapport à l'environnement de dépôt lacustre généralement à faible énergie de la formation Murray avec des grès plus fréquents.

La formation Carolyn Shoemaker est subdivisée en cinq sous unité (membre) dénommé Jura (une partie est également membre de la formation Murray) (forages « Aberlady » et « Kilmarie »), Knockfarril Hill (forages « Glen Etive », « Mary Anning » et « Groken »), et Glasgow (forages « Edinburgh », « Glasgow », « Hutton », « Nontron » et « Bardou ») composé de mudstone finement laminé. La formation Carolyn Shoemaker est composé de grès à lits croisés et de mudstone stratifiés, indiquant une circulation d'eau plus forte de rivière, de fleuve

ou de débâcle dévalent les pentes du mont « Sharp » laissant des dépôts fluvio-lacustre dans un environnement alluvial. La partie la plus basse de la formation Carolyn Shoemaker est le membre Jura qui est la continuation du membre Jura rencontré à « Vera Rubin Ridge ». La transition entre Jura et Knockfarril Hill marque le passage d'un environnement lacustre (mudstone) de longue durée et relativement calme se transformant progressivement en zone fluvial plus énergique (grès à lits croisés). Les groupes Bradbury et Mt. Sharp sont interprétés comme environnements persistants de ruisseaux, de deltas et de lacs disposés à mesure que le cratère se remplissait et que le niveau du lac augmentait, avec des changements du niveau et des périodes plus sèches intermittentes de plus longue durée entre 3,6 à 3,2 milliards d'années[26]. Le 13 janvier 2021, le rover était rendu à son 3000ème Sols a séjourné et explorer la planète Mars, et cinq jours plus tard le robot franchit le cap de son 24ème kilomètre (Sol 3005) depuis son arrivée à la surface. Une quinzième séance de roulement quotidienne supérieur au cent mètres est effectuée le 1er février 2021 (Sol 3018) en ajoutant au compteur une distance de 103.05 mètres.

Figure 194 b: Image prise le 18 avril 2021 par la caméra HiRISE de MRO (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Curiosity n'est plus le seul rover actif sur la planète Mars, il est rejoint le 18 février 2021 (Sol 3036) par l'astromobile Perseverance (voir le tome 3), qui s'est posé au nord-ouest dans le cratère d'impact « Jezero » à plus de 3 730 kilomètres de distance. Les objectifs de mission des deux rover sont très différents l'un de l'autre, là où Curiosity était conçu comme un laboratoire autonome (Mars Science Laboratory) capable de réaliser sur place des analyses longues et complexes (diffraction des rayons X, chromatographie en phase gazeuse, analyse chimique et minéralogique complexe). Perseverance s'inscrit principalement dans la perspective du retour d'échantillons, soit de rechercher et de prélever les meilleurs échantillons possible dans l'objectif de leur retour sur terre via une mission future. Après avoir parcouru plus de 5 kilomètres en deux ans à travers « Glen Torridon » entre janvier 2019 et janvier 2021 (Sols 2300-3072). Un long trajet qui incluait également la longue traversée latérale du champ de dunes « Sables de Forvie » sur plus de 2 081,27 mètres (Sols 2800-3040) effectuée en 47 séances de conduite quotidienne (Figure 193). Durant le déplacement au nord de « Sables de Forvie », l'astromobile à effectué deux séances de roulement quotidien supérieur aux cent mètres, une première séance au Sol 2817 le 9 juillet 2020 avec une distance parcourus de 101,08 mètres, et la deuxième le 1er février 2021 au Sol 3018 avec 103,05 mètres (la quinzième séance sera également la dernière de la mission). Curiosity fait son approche finale de la base de l'unité sulfatée (environnement plus acide) située à l'entrée de « Gediz Vallis », un canyon partiellement comblé mesurant environ 9 km de long sur 500 à 800 mètres de large et entre 100 à 250 mètres de profondeur. La base de l'unité sulfatée que le rover s'apprête a étudiée marque un changement par rapport aux strates argileuses fluvio-lacustres de « Glen Torridon », qui abrite les plus grandes abondances de minéraux argileux observées jusqu'à présent.

Le 8 mars 2021 au Sol 3052, l'astromobile qui est maintenant stationné au pied de « Mont Mercou » (Sols 3049-3117) d'environ 6 mètres de hauteur (Figure 194), réalise le 30ème forage sur la dalle de pierre baptisée « Nontron » (Sols 3052-71), et qui sera le dernier échantillon de forage

[26] Mission Overview and Scientific Contributions from the Mars Science Laboratory Curiosity Rover After Eight Years of Surface Operations, (05 April 2022)

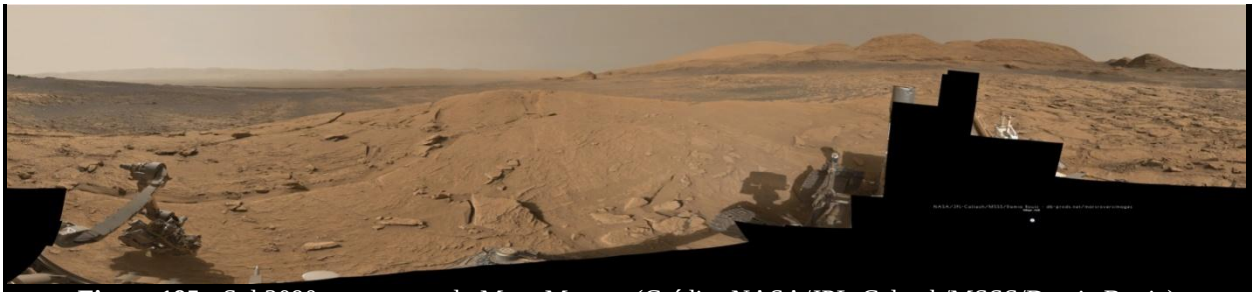


Figure 195 : Sol 3090 au sommet du Mont Mercou (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

Figure 196 : Sol 3154, le 20 juin Rafael Navarro (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Thomas Appéré)

pour la campagne « Glen Torridon » (Figure 197:A). Une séance d'analyse EGA est programmée deux semaines plus tard sur le Sol 3067 le 23 mars 2021. Les résultats d'analyses ont montrées une augmentation des signaux de soufre par rapport à « Glen Torridon », signalant que le rover quittait un environnement de lac d'eau douce riche en argile pour des conditions plus salines riche en sulfates. Des pics correspondant aux sulfates de magnésium ($MgSO_4$) et de fer ($FeSO_4$) ont également été identifiés. La goethite (α-FeO(OH)) a été détectée pour la première fois dans l'échantillon récolté à « Nontron », et sa concentration à augmenté jusqu'à la campagne d'échantillonnage qui sera fait plus tard à « Avanavero » (Sols 3510-30). Ces changements minéralogiques seraient dus à une transition de conditions fluviales/lacustres à des conditions éoliennes plus sèches. La composition chimique inorganique et organique de sept échantillons de forage exécuté dans l'unité argileuse « Glen Torridon » (Kilmarie, Glen Etive, Glasgow, Mary Anning (1-3) et Groken), ont dévoilées la présence de chlorohydrocarbure comprenant le chlorométhane (CH_3Cl) et le chlorobenzène (C_6H_5Cl) libérés à basse température, détectés au-dessus du bruit de fond dans certains échantillons. Une grande diversité de molécules organiques soufrées libérés à haute température on également été détectées dans la plupart des échantillons, comme l'éthanethiol (CH_3CH_2SH) et le thiophène aromatiques (C_4H_4S) détectés après pyrolyse dans tous les échantillons. Les analyses de SAM avec pyrolyse des échantillons provenant de « Glen Etive », « Mary Anning 3 » et « Glasgow », ont conduit à la détection de la plus grande abondance et diversité de molécules organiques soufrées. L'origine de ses molécules organiques soufrées peut s'expliquer par le mécanisme de synthèse organique dans les évents hydrothermaux. Un autre processus pour expliquer leurs présences est l'incorporation post-diagenèse du soufre par interaction avec des fluides porteur soit oxydant ou acide, comme semble le suggérer la détection de ses molécules dans la région de « Pahrump Hills ». La diagenèse à basse température est associée aux niveaux fluctuants des lacs, aux événements d'évaporation, à l'infiltration des eaux souterraines et aux remplissages de fractures de sulfate de calcium. Le passage d'unités sédimentaires contenant des phyllosilicates situé à la base du mont « Sharp » à des unités sédimentaires plus aride contenant des sulfates sur les pentes de « Gediz Vallis », atteste de changements environnementaux et climatiques plus humide à un environnement plus

Figure 197 : Nontron, Bardou et Pontours (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

sec au début de l'Hespérien entre 3,5 et 2 milliards d'années[27]. Les études d'impact suggèrent également que les systèmes hydrothermaux peuvent rester actifs pendant 380 000 ans suite à la création d'un cratère comme « Gale » (150 km). Les résultats de SAM sur la présence et l'abondance de molécules organiques confirment que les phyllosilicates et les minéraux sulfatés peuvent aider à les préserver.

C'est le début de l'automne dans l'hémisphère sud de Mars, et au Sol 3080 (5 avril 2021) le rover franchit le cap de son 25ème kilomètre parcourus à la surface de la planète. L'astromobile contourne ensuite « Mont Mercou » par le sud-ouest dans le but de grimper à son sommet (Figure 194:B et 195), pour y effectué le 31ème forage de la mission sur la cible de surface « Bardou » (Sols 3088-3108) le 20 avril 2021 au Sol 3094 (Figure 197:B). Les résultats de l'expérience EGA effectuée au Sol 3098, indique la présence de nontronite (smectite riche en fer) et de la sidérite ($FeCO_3$) (carbonate de fer). Après avoir étudié les environs durant 53 Sols, l'astromobile quitte le « Mont Mercou » en marche arrière le 5 mai 2021 (Sol 3109) pour se déplacé vers le sud-est en direction de la crête « Rafael Navarro Mountain », qui se trouve du côté ouest de l'entrer de « Gediz Vallis » (Figure 196). La texture à la surface des pavés d'affleurement qui recouvrent le sol à l'entrée de « Gediz Vallis », montre une structure finement stratifiée avec présences de nodules, de réseaux de rayures et de fissures en forme de damier semblable à des fentes de dessiccation, et qui ressemble beaucoup à la texture rencontrée sur la roche « Old Soaker » en décembre 2016, avec cependant une différence d'élévation de plus de 300 mètres entre les deux sites. Le 14 mai 2021 au Sol 3118, l'orbiteur Tianwen-1 de l'Administration nationale de l'espace de Chine (CNSA) se sépare du rover Zhurong (voir le tome 3), et qui se pose avec succès dans « Utopia Planitia » à 2 600 km au nord-ouest de Curiosity. Pour la première fois dans toute l'histoire de l'exploration spatiale, il y a quatre mission actif et en opération en même temps à la surface de la planète Mars, soit l'atterrisseur InSight et trois rover (Curiosity, Perseverance et Zhurong) qui roulent à la surface pour étudier la géologie de la planète rouge.

Le laser LIBS (spectroscopie à claquage induit par laser) de ChemCam, qui était en pause durant plus de 4 mois à cause d'une instabilité de la tension requise pour le déclenchement du laser, est de nouveau devenu fonctionnel le 3 juin 2021 (Sol 3137) avec la possibilité de faire des tirs laser pulsé. Les spectromètres de ChemCam peuvent fonctionner selon deux modes, soit le mode passif ou actif. Dans le mode d'investigation passif, le télescope de l'instrument ne transmet aux spectromètres que la lumière réfléchie du soleil par les cibles. Le mode actif utilise l'impacte d'un faisceau laser pulsé qui vaporise les surfaces rocheuses en créant un petit nuage de plasma, puis l'instrument analyse la lumière capté et retransmit par le télescope vers les spectromètres. La

[27] Evidence for Multiple Diagenetic Episodes in Ancient Fluvial-Lacustrine Sedimentary Rocks in Gale Crater, Mars (27 juin 2022)

32ème campagne de forage de la mission est exécutée près du flanc nord de « Rafael Navarro Mountain » à l'entrée de « Gediz Vallis », sur la cible de surface dénommée « Pontours » (Sol 3163-82) le 7 juillet 2021 au Sol 3170 (Figure 197:C). Les résultats de l'expérience EGA effectuée au Sol 3176, indique la présence de phyllosilicates ferriques résiduels et l'apparition des sulfates de magnésium ($MgSO_4$) et de fer ($FeSO_4$), signature caractéristique d'un milieu où les sels se sont concentrés par évaporation, marquant le passage d'un lac d'eau douce à un environnement plus salin et aride. L'expérience à « Pontours » est cruciale car elle documente le changement climatique majeur de Mars : le passage d'un monde potentiellement habitable avec de grands lacs à un désert glacé. Deux semaines plus tard le 2 août 2021 (Sol 3196), le rover franchit le cap de son 26ème kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars avec une élévation moyenne d'environ 460 mètres d'altitude. L'astromobile fête ensuite son neuvième anniversaire le 6 août 2021 au Sol 3199, toute en roulant à travers un paysage montagneux parsemé de vallée et de petites buttes (ou mesas).

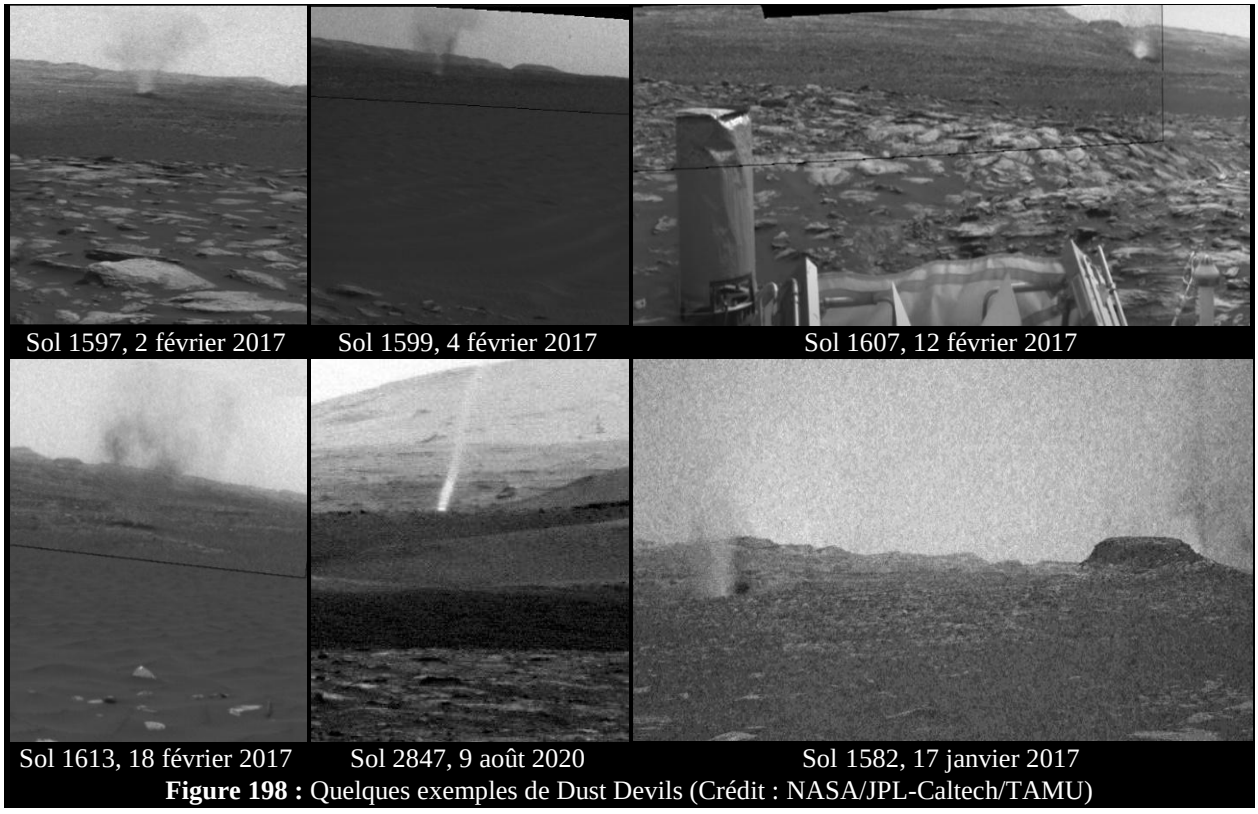


Figure 198 : Quelques exemples de Dust Devils (Crédit : NASA/JPL-Caltech/TAMU)

GEDIZ VALLIS
(Sol 3200 à 3720)

Le rover poursuit son aventure martienne à l'entrée du delta alluvial de la vallée « Gediz Vallis » au Sol 3200 le 7 août 2021. Le terrain situé à cet endroit semble coïncider avec la zone de transition du substratum argileux « Glen Torridon » et les matériaux sulfatés du plancher de « Gediz Vallis », qui se projette plus au sud pour former le fronton « Greenheugh Pediment » (cônes de déjection sédimentaires). L'analyse chimique et minéralogique du matériau va donner des indices important sur l'histoire de la sédimentation des roches, elle permettra de remonter dans le temps à travers l'analyse de sa variabilité minéralogique. Et peut-être nous permettre de mieux comprendre les changements environnemental important (brusque ?) qui témoignerait de phénomènes climatiques ponctuels, suggérant la présence de lacs successifs peu profonds à différentes époques (dépôt aqueux de type mudstone), entre caler de période de plus en plus longue acide et fréquente avec un climat de plus en plus sèche et aride, remontant jusqu'au début de l'Hespérien. Le cratère « Gale » fait partie de la classe des cratères "surremplis" qui après leur formation se sont remplis de sédiments, pour ensuite être partiellement exhumés sur une très longue période par des processus éoliens. Curiosity arrivés à la zone de transition argile-sulfate, qui débute dans le membre Mercou de la formation Carolyn Shoemaker et se poursuit jusqu'au membre Amapari de la formation Mirador, et à pour objectif de forer tous les 25 mètres de dénivelé environ, afin d'établir une échelle verticale des différentes couches sédimentaires avec un étalonnage sur un intervalle moyen de 10 millions d'années, donnant ainsi une sorte de photo sur les événements passé et ancien pour expliquer les caractéristiques d'altération chimiques et minéralogiques rencontrer par le rover.

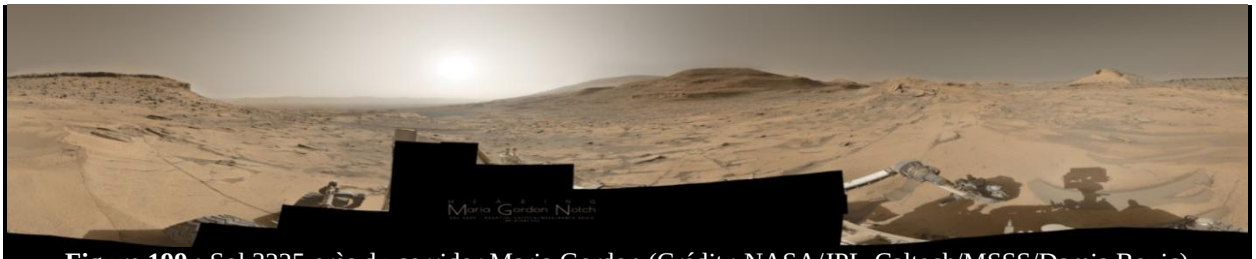


Figure 199 : Sol 3225 près du corridor Maria Gordon (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

Le 6 septembre 2021 au Sol 3229, Curiosity exécute le 33ème forage dénommé « Maria Gordon » (Sols 3222-46) située sur une dalle de roche au pied d'une falaise spectaculaire appelée « Maria Gordon Notch » (l'Entaille de Maria Gordon), à une centaine de mètres environ du fronton « Greenheugh Pediment » et du monticule « Siccar Point » (Figure 227:A). On peut apercevoir sur la figure 199 à partir du centre de l'image en allant de la gauche vers la droite : le flanc sud-ouest de la colline « Rafael Navarro Mountain » suivit par les parois abruptes de la façade sud de « Rafael Navarro Foothills », qui surplombe l'entrée sombre du corridor « Maria Gordon », vient ensuite les falaises du mur ouest du fronton « Greenheugh Pediment » haut de 12 mètres, et complètement à droite de l'image nous retrouvons le petit monticule « Siccar Point ».

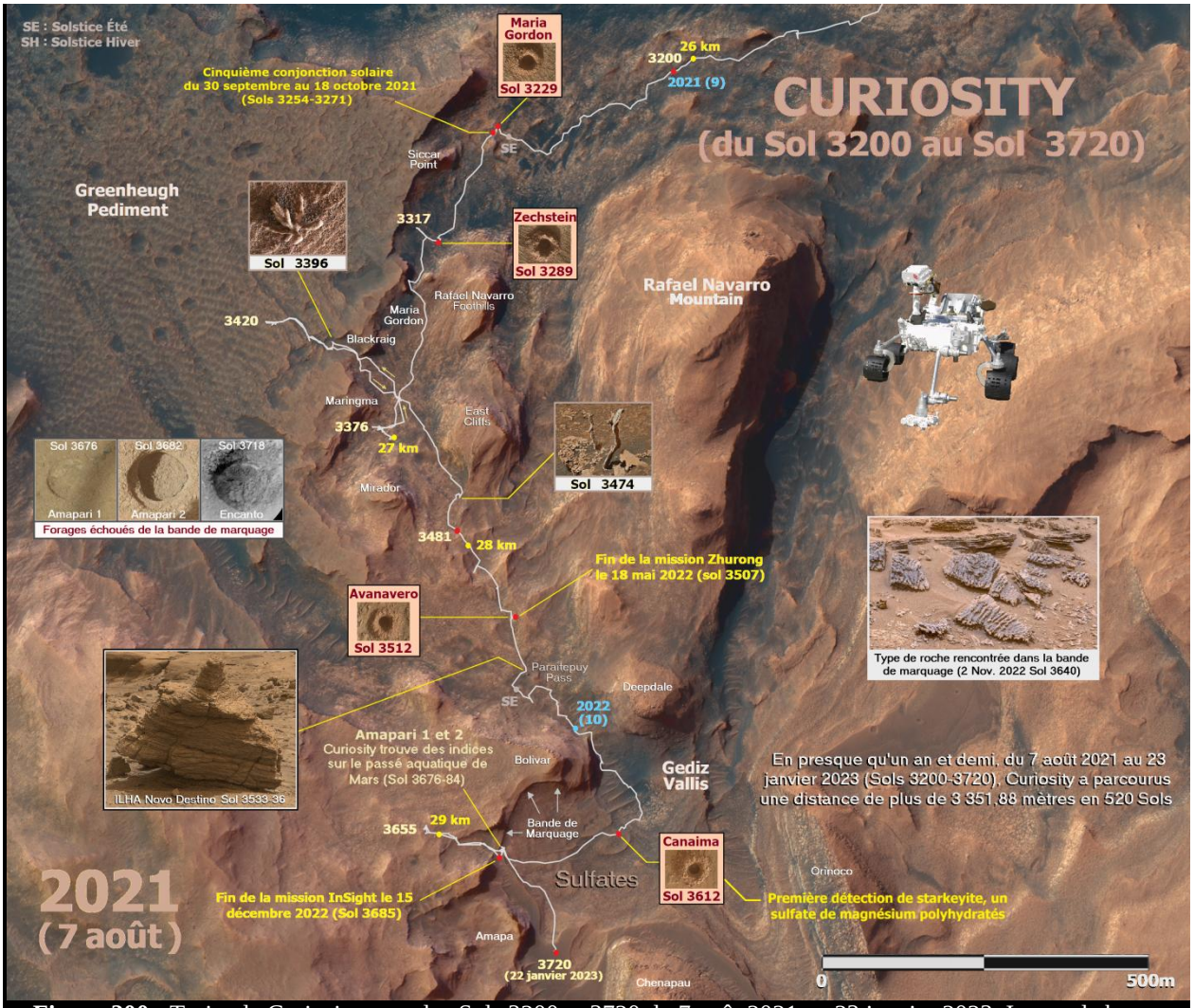


Figure 200 : Trajet de Curiosity entre les Sols 3200 et 3720 du 7 août 2021 au 23 janvier 2023. Image de haute résolution obtenu le 5 août 2021 par la caméra HiRISE et par la caméra Context de Mars Reconnaissance Orbiter (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 201 : Sol 3278 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jan van Driel)

Il s'agit de la première campagne de forage effectué dans la formation Mirador composée de grès à stratifications entrecroisées à grande échelle, et qui représente un passage d'un environnement lacustre/fluvial à un ancien environnement de dépôt éolien avec une absence de détection de phyllosilicates. L'entrée sombre du corridor « Maria Gordon » est visible au loin sur l'image situé juste à la base de « Rafael Navarro Foothills » et à gauche du petit monticule « Siccar Point ». Les résultats de l'expérience EGA effectuée au Sol 3240, indique une apparition plus forte des sulfates de magnésium ($MgSO_4$) et de fer ($FeSO_4$). Les sulfates de calcium, initialement trouvés

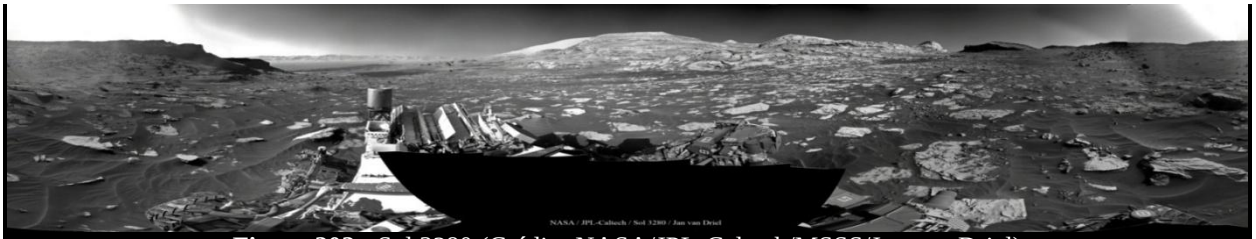


Figure 202 : Sol 3280 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jan van Driel)

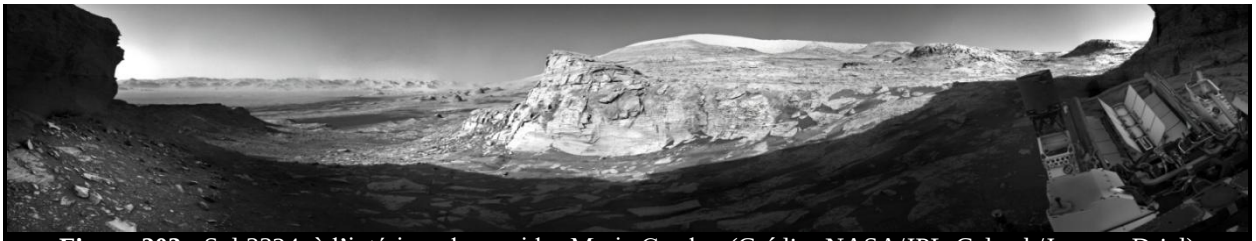


Figure 203 : Sol 3324, à l'intérieur du corridor Maria Gordon (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 204 : Sol 3326, à la sortie du corridor Maria Gordon (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

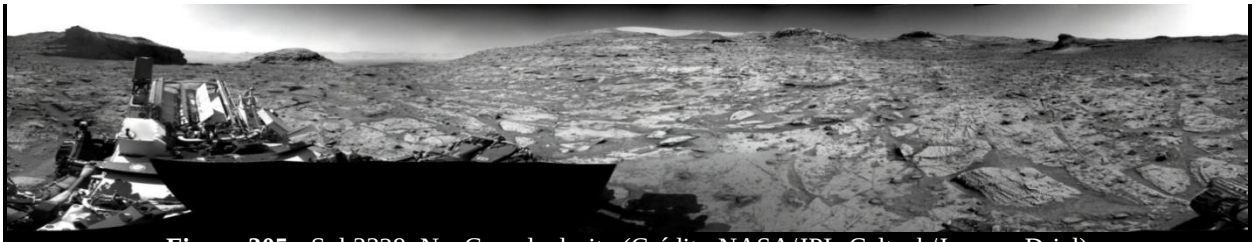


Figure 205 : Sol 3329, NavCam de droite (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

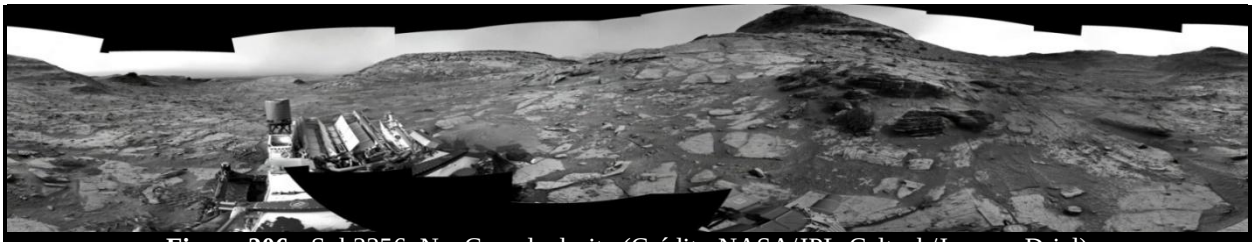


Figure 206 : Sol 3356, NavCam de droite (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

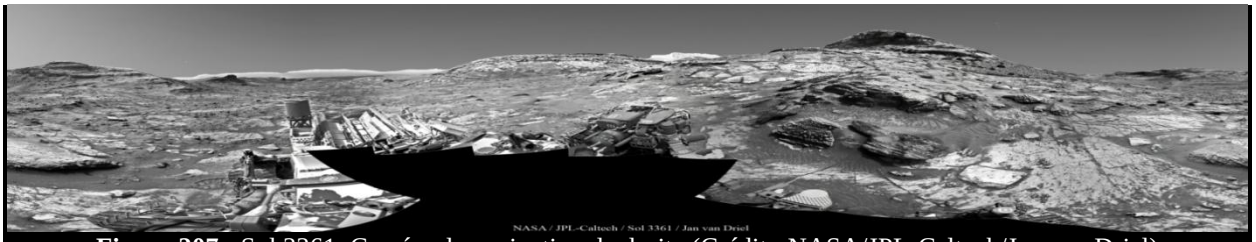


Figure 207 : Sol 3361, Caméra de navigation de droite (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

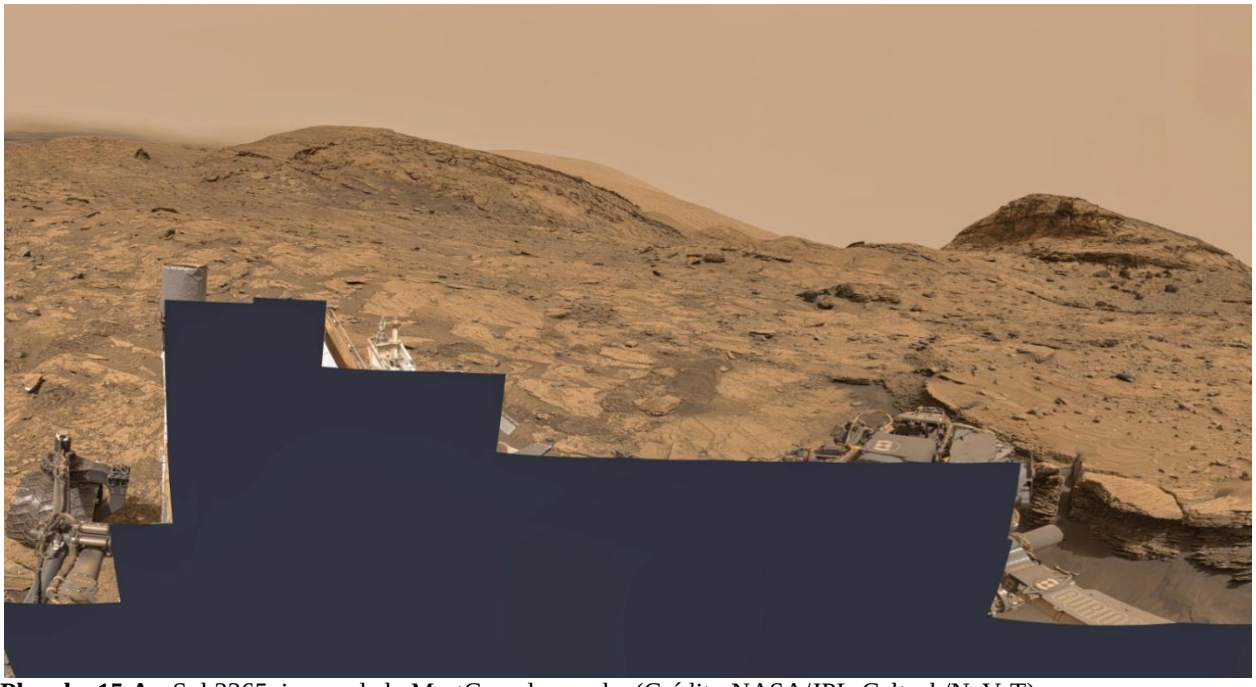


Planche 15 A : Sol 3365, image de la MastCam de gauche (Crédit : NASA/JPL-Caltech/NeV-T)

sous forme de veines, commencent à apparaître massivement comme composants principaux de la roche. Cette transition marque l'assèchement progressif de Mars : les lacs permanents ont laissé place à des épisodes d'inondations suivis d'évaporations intenses. L'astromobile se prépare ensuite à recevoir les instructions logicielles préprogrammées, qui lui seront nécessaire pour exécuter ses prochaines activités en mode automatique, afin de passer à travers le blackout radio lors de l'arrivé de la cinquième conjonction solaire prévu entre les Sols 3253 et 3271 (du 30 septembre et le 18 octobre 2021). À partir du Sol 3274, la conduite sur le terrain devient de plus en plus difficile à l'approche du corridor sombre de « Maria Gordon » bordée de parois abruptes de 12 mètres de haut. Le robot devra être prudent pour se frayer un chemin sécuritaire à travers les éboulis de gros rochers aux arrêtes pointues, et de petites dunes sablonneuses pouvant représenter un danger réel pour le rover. Les deux roues centrales du robot ont déjà subies des dommages, en particulier la roue du côté gauche qui est affaiblit par un chevron cassé (Figure 214).

Deux mois après avoir creusé le dernier forage, et parcourus 206,13 mètres en deux semaines à travers neuf séances de conduite quotidienne entre les Sols 3247 et 3286 (Figure 201 et 202). Le 34ème forage est finalement exécute sur un pavée d'affleurement se trouvant devant l'entrée nord du corridor « Maria Gordon » au Sol 3289 le 6 novembre 2021 (Figure 227:B), sur la cible de roche dénommé « Zechstein » (Sols 3286-3312). Les résultats de l'expérience EGA effectuée au Sol 3302 le 19 novembre 2021, indique une absence de phyllosilicates et de carbonate de fer, avec une dominance acrue des sulfates de calcium ($CaSO_4$) très stable et une concentration exceptionnelle d'environ 25 % en poids de gypse ($CaSO_4 \cdot 2HO_2$). Ce résultat confirme que le rover a quitté l'ancien environnement lacustre doux de « Glen Torridon » pour entrer dans une ère beaucoup plus aride, où l'eau ne faisait que s'évaporer en laissant des dépôts de sel. L'étude de la zone de travail et du terrain environnant s'étendra sur plus de trois semaines jusqu'au Sol 3311 le 29 novembre 2021. Depuis le site d'atterrissage « Bradbury Landing », Curiosité qui est immobile devant le flanc ouest du corridor « Maria Gordon » depuis le Sol

Planche 15 A : Suite Sol 3365, image de la MastCam de gauche (Crédit : NASA/JPL-Caltech/NeV-T)

3286, est monté à plus de 485 mètres d'élévation dans l'ascension des pentes du mont « Sharp ». La traversée du corridor sombre en forme de cuvette étroite de « Maria Gordon » s'effectue entre les Sols 3312 et 3333, en parcourant une distance de 255,98 en dix séances de roulement (Figure 203 à 205). Le rover poursuit sa montée dans l'objectif de trouver un accès pour grimper sur le fronton « Greenheugh Pediment ». Après avoir franchit une distance de 140,57 mètres en six séances de conduite entre les Sols 3345 et 3356 (Figure 206), l'astromobile franchit le cap du 27ème kilomètre parcourus à la surface de Mars au Sol 3356 le 14 janvier 2022 (Figure 206).

Figure 208 : Sol 3376, NavCam de droite (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 209 : Sol 3403, sur le fronton Greenheugh Pediment (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Damia Bouic)

Durant sa progression sur le terrain, le robot prend en image une étrange concrétion minérale (formation minérale précipités dans l'eau) en forme de fleur au Sol 3396 qui a été baptisée « Blackthorn Salt » (Sel de prunellier) le 24 février 2022 (Figure 211). Le rover grimpe

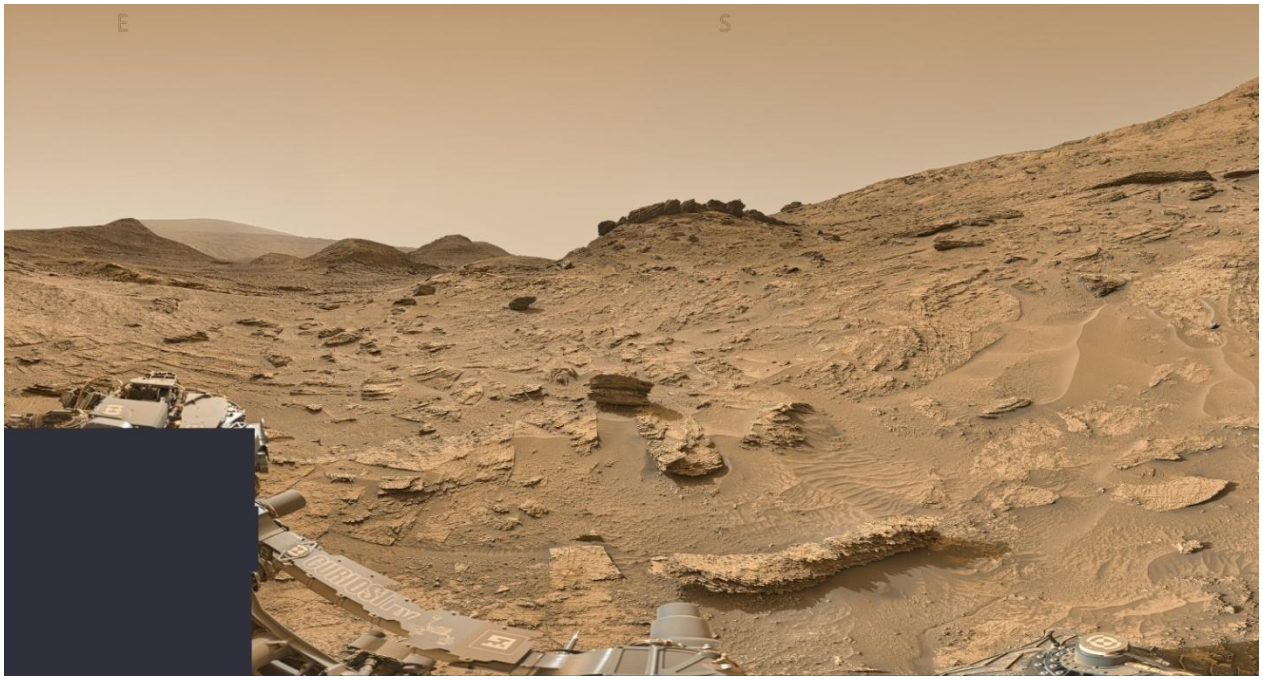


Planche 15 B : Panorama du Sol 3474 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/NeV-T)

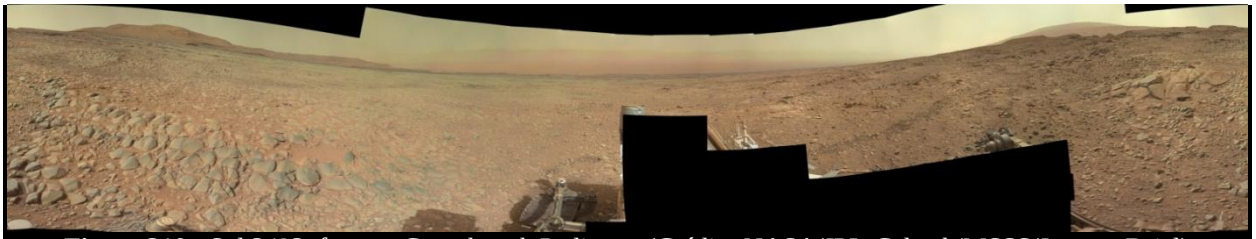


Figure 210 : Sol 3423, fronton Greenheugh Pediment (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jan van Driel)

Figure 211 : Blackthorn Salt Sol 3396 (NASA/JPL-Caltech/MSSS/Kevin M. Gill)

sur le fronton « Greenheugh Pediment » en se frayant péniblement un chemin entre les petites buttes « Maringma » et « Blackcraig » d'environ 9 et 5 mètres de haut, à travers une petite dépression qui longe la crête du fronton le 16 mars 2022 (Sol 3415). Curiosity doit cependant renoncer à son projet de rejoindre la crête centrale « Gediz Vallis Ridge » de 70 mètres de haut sur 3,5 kilomètre de long, qui se trouve de l'autre côté du fronton « Greenheugh Pediment », et de rebrousser chemin sur le Sol 3420 (21 mars) pour redescendre du fronton le 5 avril 2022 (Sol 3435). La surface du sommet est formée d'une couche sédimentaires composé de roches agressives et tranchantes très dure, polis par le vent abrasif charriant du sable fin sur de longue période de temps, comme l'illustre très bien la zone de terrain rencontrée à « Gator-Back » (Figure 210 et 212). Ce tapis de roche très dure aux arrêtes aiguisés peuvent abimer d'avantage les roues déjà fragilisées, et mettre fin aux déplacements à la surface et à la mission de Curiosité sur la planète Mars, ce qui serait dramatique pour la mission. La teneur en lithium la plus élevée a été détectée dans la cible « Eaglesham » à « Greenheugh Pediment », ce qui représente la teneur en lithium la plus élevée jamais enregistrée sur Mars jusqu'à maintenant.

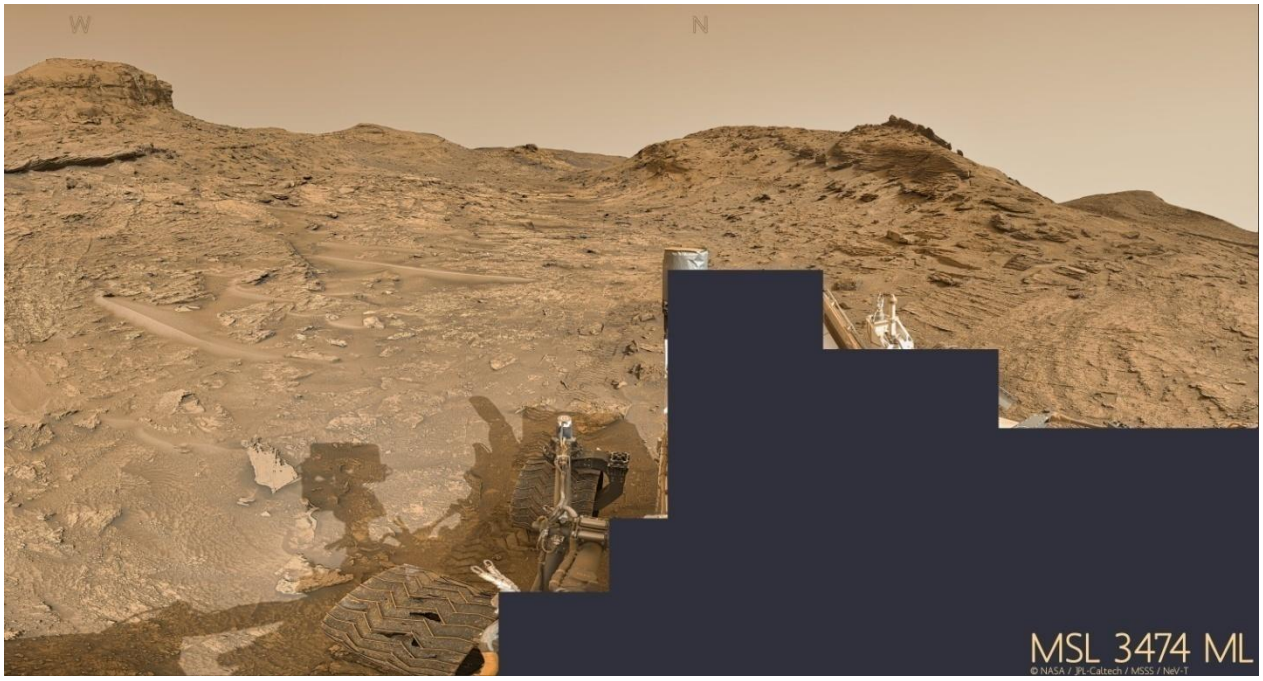


Planche 15 B : Suite du panorama du Sol 3474 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/NeV-T)

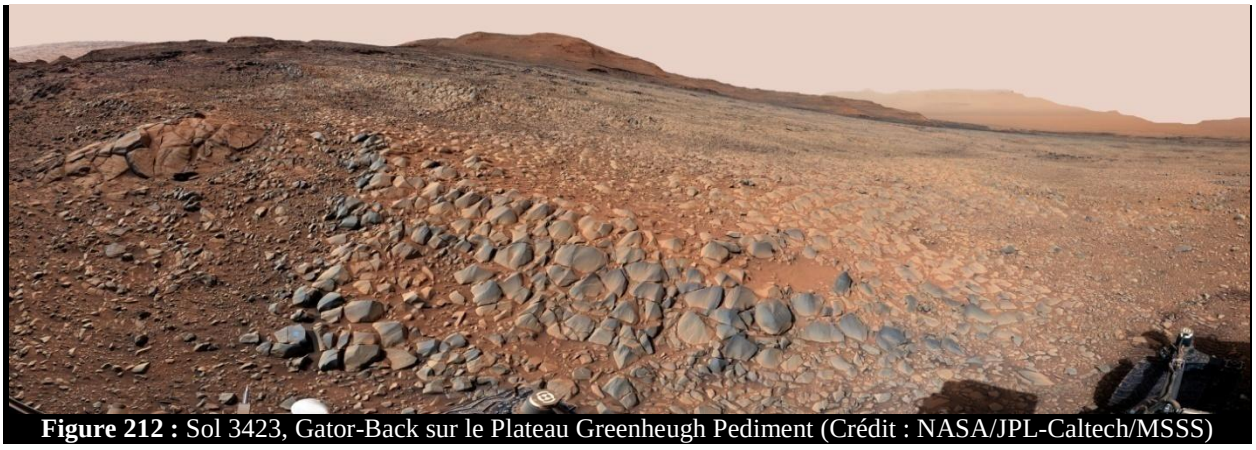


Figure 212 : Sol 3423, Gator-Back sur le Plateau Greenheugh Pediment (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 213 : Sol 3474 (Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Le rover devra donc emprunté un autre chemin pour se diriger vers le sud, en longeant les falaises abruptes parsemées de zone d'éboulis du flanc ouest de la butte « East Cliffs » d'environ 14 mètres de haut, et du flanc Est de la petite butte « Mirador » de 7 mètres, pour gravir les pentes du mont « Sharp ». Curiosity progresse vers des strates riches en sulfates composée de couches de sulfates de calcium ou de magnésium, qui se sont formées à une époque postérieure à celle des argiles rencontré lors de la traversé de la vallée « Glen Torridon ». Et qui marque une époque ou les volcans étaient plus actifs avec une présence d'eau de moins en moins abondante, indiquant une transition majeure dans le climat du cratère « Gale ». Le 4 mai 2022 sur le Sol 3463, l'astromobile a rejoint sa position de départ avant qu'il ne pivote sur lui-même en direction nord pour se déplacer vers le fronton « Greenheugh Pediment » au Sol 3379. A partir de

Planche 16 : Sol 3481 (Crédit : NASA/JPL/MSSS. Processing : Olivier de Goursac, 2022)

Figure 214 : Usure de la roue centrale côté gauche (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

cette position Curiosity explore un nouveau terrain tout en longeant les falaises Est de la petite butte « Mirador ». Durant son nouveau trajet, l'astromobile rencontre sur sa route des structures verticales de forme étonnantes sur le sol le 15 mai 2022 (Sol 3474), qui ressemble à un vestige d'érosion d'anciennes veines de gypse (Figure 213, et en bas dans la partie gauche de l'image de droite de la Planche 15:B, situé juste en haut du petit affleurement de teinte clair). Ses structures rocheuses se sont probablement formées lorsque les eaux souterraines s'écoulaient toujours à travers la roche dans le passé antique, déposant au fil du temps une matrice minéral agissant comme ciments. Avec le temps l'action du vent a érodé la matrice de matériau plus mou en exposant la roche plus dure à la surface. La verticalité est maintenue en place grâce à la faible gravité martienne et a une résistance plus forte à l'érosion éolienne.

Après un déplacement de près de 73,3 mètres en trois Sol. Le rover capture un nouveau panorama couleur de 360° près du cite « Sierra Maigualida » avec ses matériaux de type « Prow » le 22 mai 2022 (Sol 3481). L'image initiale de la MastCam est composée de 133 images individuelles dont une partie a été retouché par Olivier de Goursac (Planche 16 et Figure 215:A). Une autre image prise beaucoup plus tôt au cours de la mission au Sol 1099 le 9 septembre 2015 (Figure 215:B), soit juste après avoir franchit le onzième kilomètre, nous offres un second point de vue situé 540 mètres plus bas. Les images nous permettent d'identifier les différents reliefs du paysage montagneux (buttes et collines) entourant le trajet du rover martien. Le rebot franchit la barre de son 28^{iem} kilomètre parcourus à la surface de Mars le 27 mai 2022 au Sol 3485. Une semaine plus tard sur le Sol 3492 (3 juin 2022), des images prise par la caméra MAHLI montre la progression de l'usure des roues qui semble se dégrader plus rapidement du côté gauche du rover (Figure 214). Pour minimiser l'usure des roues les ingénieurs du laboratoire JPL de la NASA ont développé le logiciel « anti patinage », qui a subi 18 mois de tests avant d'être téléchargé sur le système informatique de bord de Curiosity en mars 2020. Ce dernier ajuste la vitesse de rotation des roues de l'astromobile en fonction des difficultés et des rochers qu'il escalade durant son parcours en mode automatique.

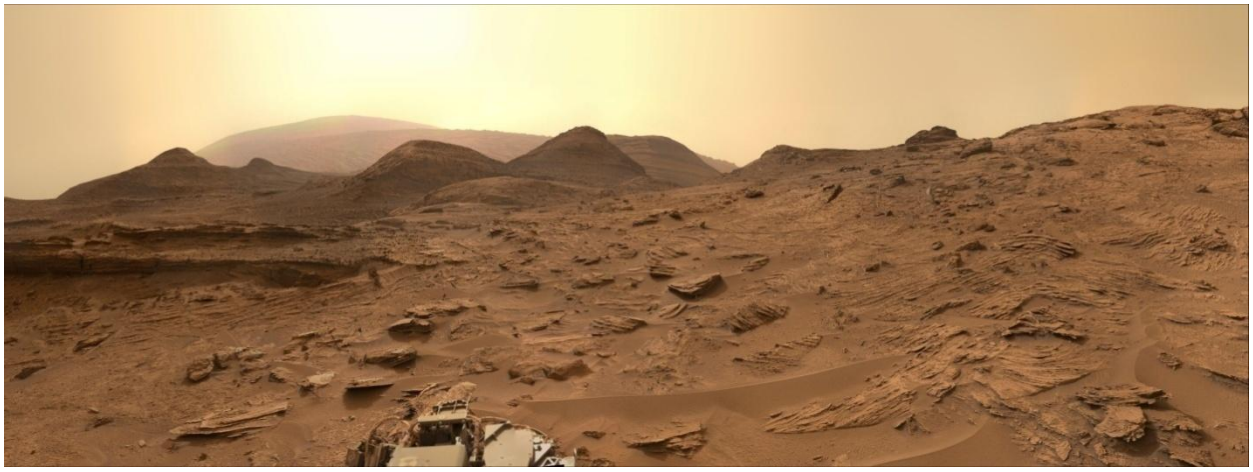


Planche 16 : Suite : Sol 3481 (Crédit : NASA/JPL/MSSS. Processing : Olivier de Goursac, 2022)

Le petit rover Zhurong appartenant à la mission chinoise Tianwen-1 en opération dans la région « Utopia Planitia » sur Mars depuis le 14 mai 2021. Faisant ainsi de la Chine le deuxième pays à avoir réussi à faire atterrir un vaisseau spatial à la surface de la planète Mars après les États-Unis, et toujours capable par la suite d'établir des communications avec la terre et de poursuivre les différents objectifs de sa mission. Zhurong qui avait à l'origine une durée de vie principale de trois mois terrestres a été déployé avec succès le 22 mai 2021. Le rover alimenté par quatre panneaux solaires a été en opération sur Mars une année entière jusqu'au 18 mai 2022 (361 Sols/369 jours), ayant parcourus une distance totale de 1 921 mètres dans la région sud de son site d'atterrissage (Figure 216). Le

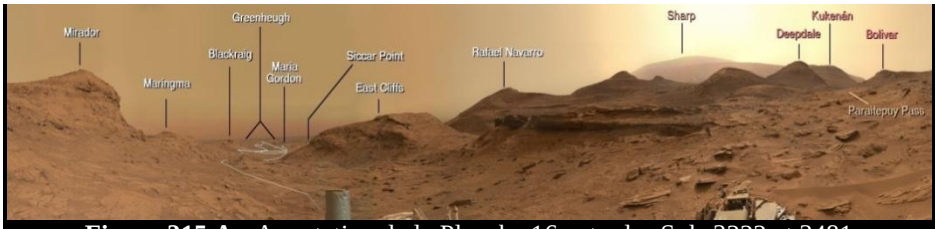


Figure 215 A : Annotation de la Planche 16 entre les Sols 3222 et 3481

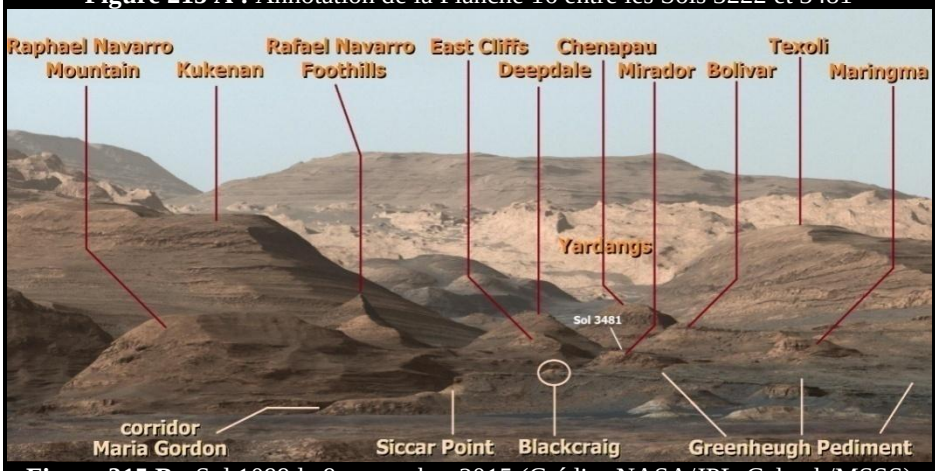


Figure 215 B : Sol 1099 le 9 septembre 2015 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 216 : Le rover Zhurong au Sol 20 de sa mission le 3 juin 2021 (Crédit : CSA/Doug Ellison)

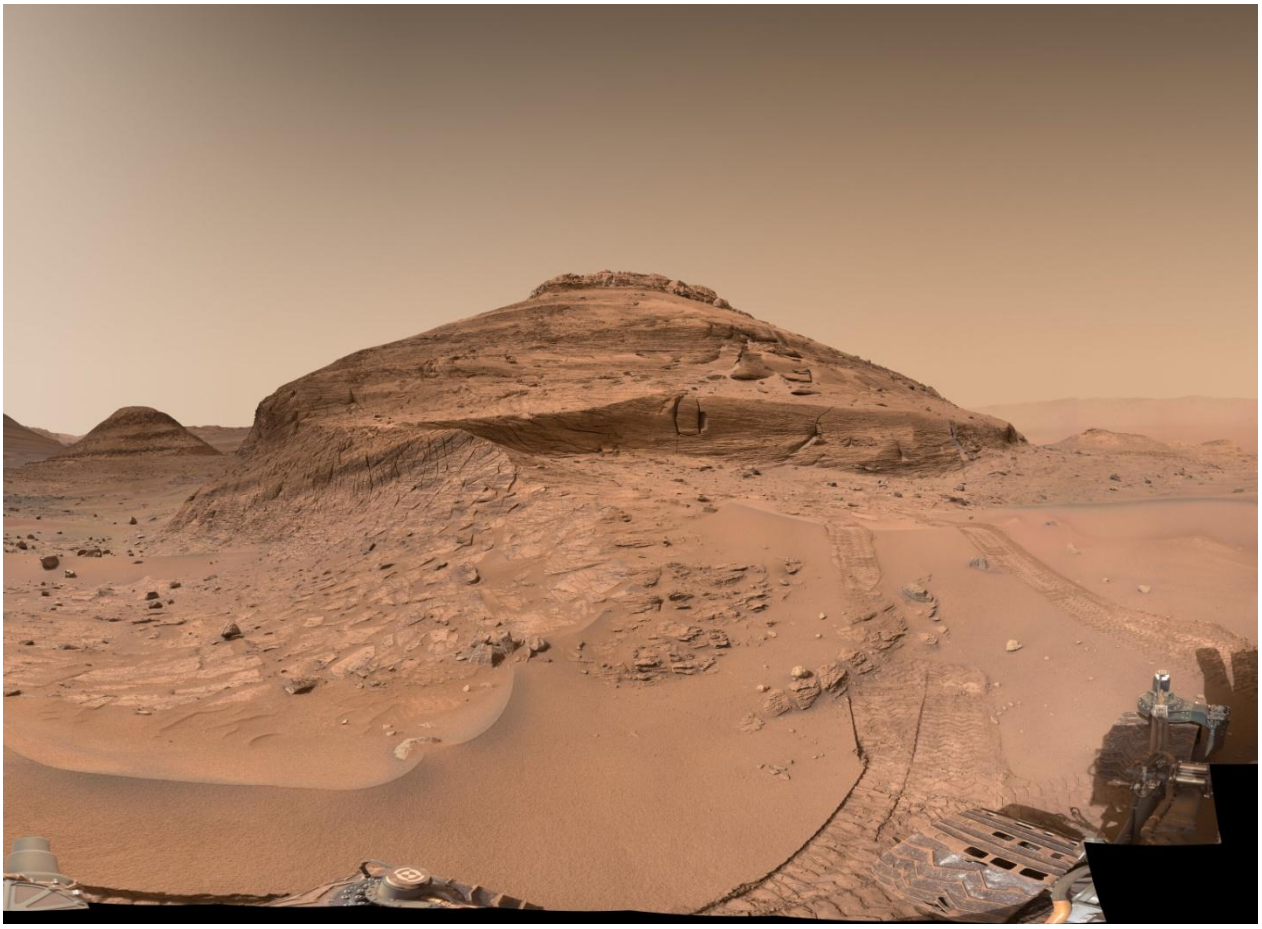


Planche 17 : Sol 3563, Les buttes Bolivar et Deepdale à droite (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Thomas Appéré)

robot qui se préparait a passé à travers le passage du solstice d'été prévu dans deux mois le 23juillet 2022 (Sol 3541), devait au même moment se protégé d'un ciel qui devenait de plus en plus empoussiéré pour résister à l'emprise d'une tempête de poussière qui sévissait au-dessus de la zone d'exploration de l'astromobile. Le bilan d'énergie devenant de plus en plus faible, et pour faire face a l'urgence de cette situation. L'astromobile de cette première mission interplanétaire de la Chine à reçu la commande d'entrer en mode hibernation le 18 mai 2022 au Sol 3477 (soit au Sol 361 de sa mission), pour une durée de six mois jusqu'à l'arrivé de l'équinoxe du printemps prévu pour le 26 décembre 2022. Toutes les tentatives de communications pour reprendre le contrôle du rover ont cependant échoué, signalant ainsi la fin de mission de Zhurong sur Mars.

Le type de sédiment rencontré par le rover sur sa route se serait formé dans un ancien lit de ruisseau ou un petit étang peut profond. Plus de sept mois et demi après avoir effectué le forage de « Zechstein » le 6 novembre 2021 (Sol 3289). Le rover Curiosity entame la 35ème campagne de forage de la mission sur la cible dénommée « Avanavero » (Sols 3510-30), faisant partie du membre Contigo de la formation Mirador constitué en grande partie de la migration de dunes éoliennes simples. Et après avoir étudié quelque peut le terrain l'astromobile exécute la séance de forage le 23 juin 2022 au Sol 3512 (Figure 227:C). Les résultats de l'expérience EGA effectuée au Sol 3528 le 10 juillet 2021, indique un mélange de signatures chimiques de type évaporite, confirmant que le rover quittait définitivement l'ancien lac d'eau douce vers le passage dans l'unité riche en sulfates de calcium ($CaSO_4$) et de magnésium comme l'epsomite

Planche 17 : Suite : Sol 3563 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Thomas Appéré)

Figure 217 : ILHA Novo Destino au Sol 3533 le 14 juillet 2022 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jan van Driel)

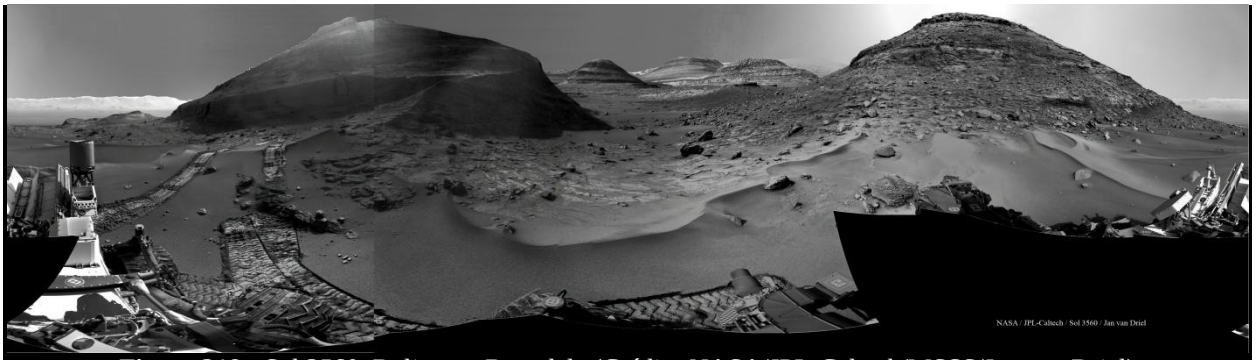


Figure 218 : Sol 3560, Bolivar et Deepdale (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jan van Driel)

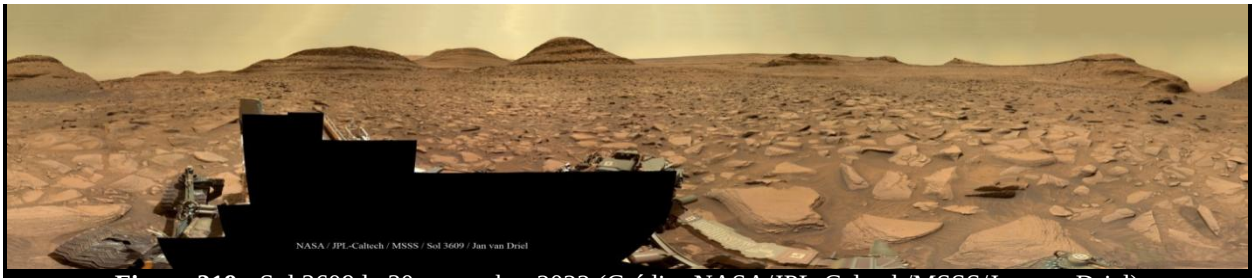


Figure 219 : Sol 3609 le 30 septembre 2022 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jan van Driel)

($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Dans les conditions très sèches de Gale (et à l'intérieur du rover), l'epsomite tend à se déshydrater pour devenir de la starkeyite.

La planification de la conduite du rover sur le terrain à travers la vallée encaissée avec des inclinaisons élevées, conduit le robot vers le passage « Paraitepuy Pass » situé entre les buttes « Deepdale » de 62 mètres de haut et « Bolivar » avec 54 mètres. Il est à noter que la butte « Deepdale » est situé à l'extrémité sud de la crête « Raphael Navarro Mountain ». La conduite est rendu très difficile et périlleuse à cause des zones d'éboulis parsemées de gros rochers qu'il faut éviter de toute urgence en zigzagant à travers une route pour tenter de se frayer un chemin plus sécuritaire. De plus les communications avec la Terre sont rendu plus difficiles, en partie causée par les hautes collines qui bloquent des parties du ciel qui se trouvent dans la ligne de visée des communications avec la Terre ou avec les orbiteurs de Mars. Après l'étude du site de forage « Avanavero », l'astromobile se déplace de 87,13 mètres en trois Sols et rencontre sur sa route le gros bloc rocheux « ILHA Novo Destino », qu'il étudiera par la suite entre les Sols 3533 et 3536 (Figure 217). Il s'agit d'un gros bloc rocheux de cinq mètres de large et de haut située à une centaine mètres de « Paraitepuy Pass », que l'on peut voir juste derrière le rocher à droite sur la figure 217 avec en arrière plan les buttes « Deepdale » à gauche et « Bolivar » à droite. Curiosity fête son dixième anniversaire d'exploration sur la planète Mars le 6 août 2022 (Sol 3555).

Figure 220 : Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS

Le rover qui roule toujours sur les pentes du mont « Sharp » est maintenant rendue à une élévation de 615 mètres. Après avoir traversé péniblement les ondulations de dunes et les blocs rocheux qui tapissent l'étroit col « Paraitepuy Pass » entre le 2 et le 26 août 2022 (Sol 3551-74), tout en franchisant une distance de plus de 231,66 mètres effectuée en 12 séances de conduite quotidienne. L'astromobile contourne la butte « Bolivar » par le sud-ouest et se met en route vers la vallée de teinte plus claire baptisée « Marker Band » (Figure 219 à 221), qui est délimitée par les buttes « Orinoco », « Chenapau », « Deepdale » et « Bolivar ». Des séquences stratigraphiques distinctes alternant des tons foncés et des tons clairs ont été identifiées sur chaque butte, les unités plus sombres témoignent de conditions plus humides tandis que les unités plus claires reflètent une sédimentation éolienne plus sèche et continue. La zone de la « Bande de Marquage » (Marker Band), qui marque le début de l'unité stratifiée sulfatée, est recouverte d'une couche stratigraphique faisant partie du membre Catrimani de la formation Mirador, considérées comme étant probablement des grès. Le substrat rocheux sous-jacent a radicalement changé passant de sombre et nodulaire à clair relativement lisse parsemé de dalles et de roches de teinte clair. La

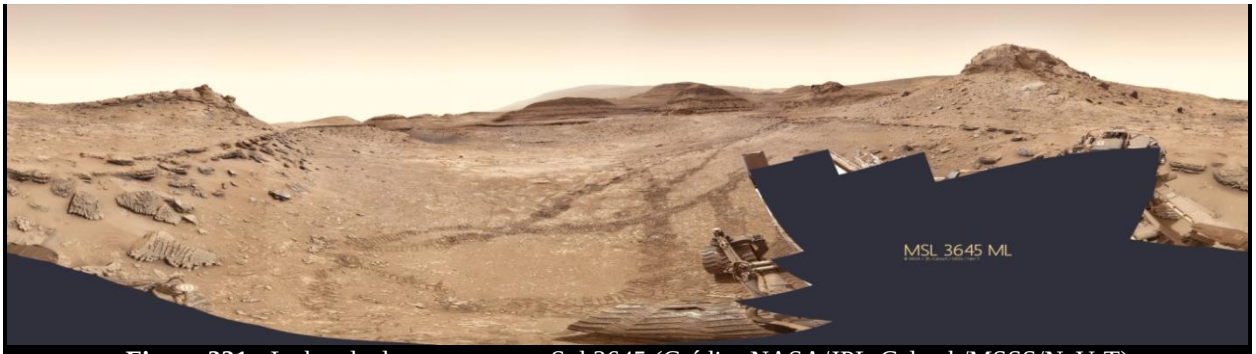


Figure 221 : La bande de marquage au Sol 3645 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/NeV-T)

présence de roches contenant du sulfate de magnésium témoigne de la transition entre un climat chaud et humide (riche en phyllosilicates) et un climat froid et sec (riche en sulfates). À cet endroit, Curiosity a mis en évidence les vestiges d'un vaste lac, ainsi que des formes de relief interprétées comme des roches sédimentaires laminées à rides (Figure 225), probablement déposées en eau peu profonde avant de former un lac plus profond. Ces roches sont enrichies en fer (Fe), manganèse (Mn) et en zinc (Zn), ce qui a des implications majeures pour la paléohydrologie des eaux souterraines du cratère Gale.

Figure 222 : Météorites rencontrées aux Sols 3626-3706 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Kevin M. Gill)

L'astromobile a maintenant atteint « l'unité contenant des sulfates » enrichie de minéraux salés, il s'agit d'une région du mont « Sharp » faisant partie de l'un des objectifs principaux de la mission. La 36ème campagne de forage et de collecte d'échantillon de la mission est exécuté cinq semaines plus tard, sur une cible se trouvant à la surface d'un bloc rocheux dénommée « Canaima » (Sols 3602-28) le 3 octobre 2022 sur le Sol 3612 (Figure 227:D) atteignant une profondeur de 3,65 cm. Il s'agit d'une roche finement stratifiée parsemée de minuscules nodules à sa surface que nous pouvons voir avant le forage en bas vers le centre de la figure 219. Au mois d'octobre 2022, la mission de Curiosity est prolongée pour la quatrième fois couvrant une durée de trois ans jusqu'en 2025. Trois analyses nocturnes à la température la plus basse possible ont été réalisées par le laboratoire de chimie minéralogique CheMin sur des portions d'échantillon de poudre provenant de « Canaima », d'une durée de 22 heures échelonnée sur 13 Sols. L'analyse de la première nuit a commencé juste après la fin du Sol 3614 (6 octobre 2022), environ 9 heures après la livraison de l'échantillon à CheMin. La starkeyite ($MgSO_4 \cdot 4HO_2$), un minéral de sulfate de magnésium cristalline hydraté, a été identifiée sans ambiguïté dès l'analyse de la première nuit (~22%). Une deuxième analyse a eu lieu deux nuits plus tard (fin du Sol 3616), et la troisième analyse 11 nuits plus tard (fin du Sol 3627), mais sans observé la trace de sulfate de Mg cristallin qui se déshydratent au fil du temps. Pour la première fois sur Mars, la starkeyite un minéral cristallin de sulfate de magnésium polyhydratés a été définitivement identifié à l'aide de l'instrument de diffraction des rayons X de CheMin et par l'instrument SAM lors de l'expérience EGA réalisée au Sol 3617 dans les résidus de poudre provenant d'un grès éolien de l'échantillon de poudre de roche de « Canaima »[28]. Les sulfates de magnésium très solubles sont de bons indicateurs climatiques servant d'indicateur de transition

[28] Étude minéralogique du sulfate de magnésium sur le site de forage Canaima, 30 octobre 2023

vers un climat plus sec, car ils réagissent très bien aux changements de température et d'humidité relative lors de l'évaporation d'anciennes saumures martiennes. Pendant toute la durée de l'analyse de l'échantillon de « Canaima », la température à l'intérieur du rover (et de CheMin) a varié entre 6 et 30 °C, ce qui a entraîné une humidité relative (~0,1%). Des études expérimentales ont montré que de nombreux sulfates de magnésium hydratés perdent leur eau d'hydratation et que certains retrouvent un état amorphe dans ces conditions. On observe également une diminution du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) et une augmentation concomitante de la bassanite ($CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$)[29].

Citation extrait d'un article de la NASA[30] : «« Les données recueillies par le rover Curiosity[31] ont révélé que les cristaux individuels d'hématite, un oxyde de fer, peuvent servir de marqueur minéralogique des changements climatiques survenus sur Mars dans le passé. La forme et la structure de ces cristallites reflètent les conditions de leur formation, notamment la température et la présence d'eau, et permettent ainsi de dater ces changements. Des scientifiques ont étudié 20 échantillons prélevés par Curiosity à différentes altitudes dans le cratère « Gale » (ajout de l'auteur : Confidence Hills 40,49 m, Mojave2 41,44 m, Okoruso 71,83 m, Marimba 90,32 m, Quela 121,74 m, Sebina 140,11 m, Duluth 309,37 m, Stoer 330,61 m, Highfield 354,25 m, Rock Hall 357,31 m, Glen Etive 2 368,05 m, Glasgow 392,94 m, Mary Anning 3 393,2 m, Groken 393,2 m, Bardou 434,5 m, Pontours 459,8 m, Maria Gordon 485 m, Zechstein 513 m, Avanavero 591 m, Canaima 623 m). Les parois du cratère « Gale » révèlent l'histoire environnementale de Mars couche par couche, les zones les plus profondes abritant les premières années de la planète. L'équipe a analysé les données de l'instrument CheMin (Chemistry and Minerology) du rover et a découvert que la taille des cristallites d'hématite variait selon l'altitude. Ils ont également constaté que la goethite, un minéral qui se forme généralement avec l'hématite, était absente des échantillons provenant des basses altitudes, mais présente dans ceux des hautes altitudes. Ceci suggère que des eaux souterraines chaudes ont pu subsister jusqu'à 4,7 millions d'années dans les couches les plus profondes du cratère « Gale » et que, pendant une grande partie de cette période, ces aquifères de longue durée auraient pu être potentiellement habitables.

« Nous avons constaté que des conditions chaudes et humides ont persisté pendant de longues périodes dans les roches enfouies, malgré le refroidissement du climat martien », explique Tanya Peretyazhko, co-auteure principale de l'étude et planétologue au sein de la division Recherche et exploration des astromatériaux du Centre spatial Johnson de la NASA à Houston. « Cela signifie qu'au cœur de ces roches, ces conditions plus chaudes auraient pu créer des conditions habitables pendant des périodes beaucoup plus longues, à condition que d'autres facteurs essentiels soient réunis. »

Les oxydes de fer sont considérés comme des indicateurs de l'activité de l'eau car ils se forment en sa présence. Cette étude montre que l'hématite peut également servir de marqueur des changements climatiques, en fonction de la taille et de la structure de ses cristallites, qui varient selon la température. Les scientifiques ont constaté que les cristallites d'hématite provenant des zones de haute altitude du cratère « Gale » mesuraient moins de 10 nanomètres, tandis que celles provenant des zones de basse altitude étaient généralement plus grandes, atteignant jusqu'à 65 nanomètres. Ces résultats concordent avec les observations selon lesquelles les échantillons prélevés en haute altitude contenaient à la fois de l'hématite et de la goethite, alors que les échantillons prélevés en basse altitude étaient dépourvus de goethite. Ils ont conclu que, dans des conditions plus chaudes, lorsque le pH de l'eau est neutre ou légèrement alcalin, la goethite peut se transformer en hématite. Ces conditions plus chaudes ont également favorisé une augmentation de la taille des cristallites d'hématite dans les couches profondes du cratère « Gale », par un processus appelé maturation d'Ostwald, au cours duquel les plus petits cristallites se dissolvent et contribuent à la croissance des plus gros.

« Cela peut indiquer que les couches supérieures étaient plus froides et moins hydratées, ou que la présence d'eau y était relativement éphémère, ne laissant pas aux cristallites le temps et les conditions nécessaires à leur croissance », explique Peretyazhko. « En revanche, les couches inférieures contenaient de l'eau chaude stagnante, ce

[29] The Chemistry and Mineralogy (CheMin) X-ray Diffractometer on the MSL Curiosity Rover: A Decade of Mineralogy from Gale Crater, 29 May 2024
[30] La NASA utilise des marqueurs minéralogiques pour comprendre le climat martien ancien, 28 mai 2026
[31] Hematite is a mineralogical marker of ancient climate change on Mars, Science Vol 392, 28 May 2026

qui a permis à ces cristallites de se développer. »

L'un des aspects uniques de cette étude réside dans le fait que les données proviennent d'échantillons martiens et non de modélisations théoriques. Le bras robotique de Curiosity a acheminé de la poudre de roche jusqu'à l'entonnoir d'entrée de CheMin, où elle a été analysée. « Grâce aux diagrammes de diffraction des rayons X de CheMin, nous pouvons déterminer la taille et les dimensions des cristaux d'hématite, des informations impossibles à obtenir par l'analyse satellitaire de la surface martienne », a déclaré Tom Bristow, chercheur principal de l'instrument CheMin au centre de recherche Ames de la NASA, situé dans la Silicon Valley en Californie. Ashwin Vasavada, scientifique du projet Curiosity au Jet Propulsion Laboratory de la NASA en Californie du Sud, a déclaré que CheMin est capable d'effectuer des mesures avec une fidélité scientifique extraordinaire.

« Cela ne se contente pas de signaler la présence d'hématite », a expliqué Vasavada. « On peut utiliser ces données pour déterminer la taille et la forme des cristallites d'hématite ainsi que la présence d'autres minéraux apparentés, autant d'éléments nécessaires à l'obtention de ce résultat. ». »» FIN de Citation.

La diminution de l'activité de l'astromobile vient de la chute progressive de son bilan énergétique. Contrairement aux précédents rovers qui fonctionnaient grâce à l'énergie solaire pour recharger leur batterie. Curiosity utilise un Générateur Thermoélectrique à Radioisotope MMRTG (Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator) fonctionnant avec de l'oxyde de plutonium pour produire son électricité et recharger ses deux batteries au lithium-ion qu'il recharge pendant la nuit. Le générateur RTG convertit la chaleur de la réaction de fission du plutonium 238 radioactif, ayant une demi-vie de 87,7 ans et qui se désintègre progressivement en émettant des particules alpha (noyaux d'hélium), dont le freinage par les matériaux environnants crée une forte augmentation de température qui est ensuit transformée en électricité par des thermocouples, qui se dégradent plus rapidement avec l'âge. Les thermocouples fonctionnent à partir de la différence de température entre une zone chaude et une zone froide. La source de puissance nucléaire RTG dégageant 2 kW thermique pour 110 watts électrique et la capacité énergétique du RTG diminue de 0,787 % par an, soit environ d'un watt tous les 80 Sols. Le rover a besoin entre 45 à 70 watts de cette puissance en tout temps juste pour se maintenir au chaud, afin de lutter contre le froids martien. Il a besoin d'un minimum de 150 watts pour se maintenir éveiller et d'être à l'écoute des communications terrestre ou des satellites relais qui gravite autour de Mars, et jusqu'à 500 watts quand il se déplace sur le sol martien. L'astromobile est actif que 6 heures chaque jour en moyenne, il est donc complètement dépendant de ses batteries pour mener à bien ses différentes activités. La perte de puissance électrique devient donc plus problématique avec le temps pour maintenir les différentes activités et fonctionnalité du rover, dont l'aspect critique deviendra préoccupant à partir de 2024.

Une semaine après avoir complété le panorama de la bande de marquage au Sol 3645 (Figure 221), le rebot franchit le cap de son 29ème km parcourus à la surface de Mars le 13 novembre 2022 au Sol 3651. Plus au nord dans la région de « Elysium Planitia », l'atterrisseur InSight (Figure 223) entièrement consacrée à l'étude de la structure interne de la planète, rencontre de sérieux problèmes de production d'énergie. Les panneaux solaires étant complètement empoussiérés

Figure 223 : InSight (Sol 10-14)
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Andrew Bodrov)

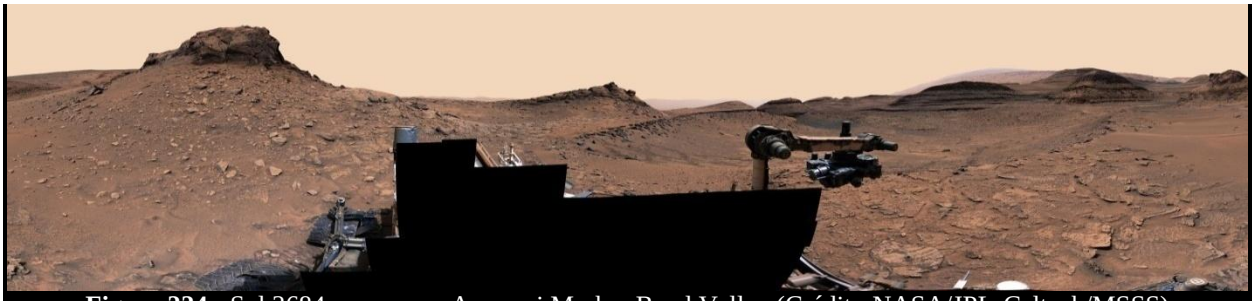


Figure 224 : Sol 3684, panorama Amapari Marker Band Valley (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 225 : Sol 3684 et l'image de droite Sol 3646 (Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS)

ils ne produisent plus assez d'énergie pour recharger les batteries. Après quatre années (1440 Sols) de bon et de loyaux services rendus sur l'étude par sondages sismiques interne de la planète, le bilan d'énergie n'est plus en mesure de maintenir en fonction les différents appareils de l'atterrisseur. Le dernier contacte radio a été reçu le 15 décembre 2022 (Sol 3682), et après deux tentatives de reprises de contacte la fin définitive de la mission fut déclaré une semaine plus tard. Le 24 décembre 2021, soit tout juste un an avant la fin de la mission, Insight a enregistré un séisme de magnitude 4 causé par un impact de météorite de 150 mètres de diamètres situé dans la région « Amazonis Planitia ». La région de l'impacte a pour la première fois été identifié deux mois plus tard sur des images de la caméra haute résolution (30 cm/pixel) de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), qui est capable d'identifier depuis l'orbite des objets d'un mètre se trouant au sol.

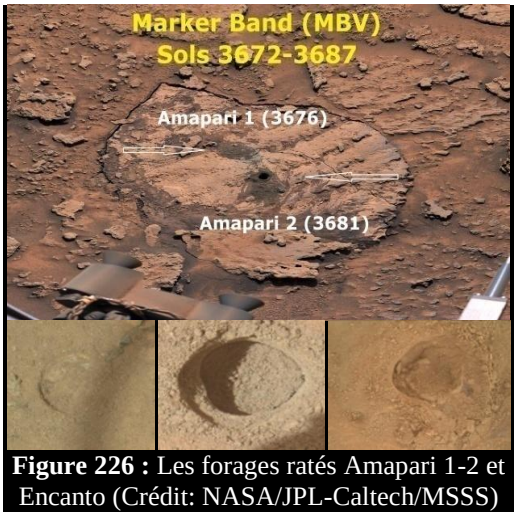


Figure 226 : Les forages ratés Amapari 1-2 et Encanto (Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS)

L'astromobile Curiosity échoue dans une tentative de grimper au sommet de l'escarpement situé au sud de « Bolivar » entre les Sols 3645 et 3658, dans le but de rejoindre le plateau du fronton « Greenheugh Pediment ». Le rover revient sur ses pas, et entame ensuite deux tentatives de forages qui vont échoués le 9 et le 15 décembre 2022 (Sol 3676 et 3682) sur une roche très dure baptisé « Amapari 1 et 2 » (Figure 224 et 226). Car n'ayant pas atteint la profondeur requise et les images de la caméra MAHLI (Sol 3685) ont révélé qu'il n'y avait pas assez de poudre de roche dans le mécanisme pour effectué une analyse SAM-EGA. La première tentative à donc échoué pour obtenir un échantillonnage suffisant de poudre de roches provenant de la bande de marquage soupçonné de contenir des sulfates de magnésium. Au Sol 3684 le 17 décembre 2022, Curiosity entame le vaste panorama de 360° dénommé « Marker Band Valley » (Figure 224), assemblé à partir d'une mosaïque composée de 137 images individuelles. Dans le cratère « Gale », la transition argile-sulfate et la présence d'assemblages minéraux d'évaporites peuvent apporter des informations précieuses sur la chronologie du changement environnemental. Par exemple lors de l'exploration du membre Chenapau de l'unité sulfatée, le rover a rencontré un

ensemble de veines sombres enrichies en sodium et en chlore (entre les Sols 3824 et 3912[32]) évoquant la présence d'halite (NaCl), témoignant d'un environnement de dessèchement qui suggère que les fluides salins (saumure) responsables de la précipitation de l'halite ont été introduits après les stades les plus récents de l'activité fluidique dans le cratère. L'halite est très soluble et elle est généralement le dernier minéral à cristalliser à partir d'une saumure en évaporation. Avant d'atteindre l'unité sulfatée, la détection d'halite se limitait à des grains isolés dans le substratum rocheux ou en bordure de veines de sulfate de calcium.

Les textures rocheuses ondulées trouvées dans cette zone (Figure 225:A) près des tentatives échoués des forages de « Amapari 1 et 2 », comme le montre la figure 224 sur l'affleurement rocheux de forme circulaire situé sous le bras du rover, sont les preuves les plus claires vues par le rover jusqu'à maintenant de la présence d'eau et de vagues dans l'histoire très lointain de Mars. Les couches rocheuses se sont formées dans un environnement plus humide que les régions explorées plus tôt dans la mission. On pense que les sulfates de la région – des minéraux salés - ont été laissés sur place lorsque l'eau saumâtre plus acide était réduite à un filet. L'équipe de Curiosity a donc été surprise de découvrir la preuve la plus claire à ce jour de la présence d'anciennes rides de courant d'eau peu profondes fossilisées entre les dunes qui se sont formées dans les lacs (datant de 3,2 à 3,5 milliards d'année). Il y a des milliards d'années, les vagues à la surface de lacs interdunaires peu profond ont remué les sédiments qui se trouvaient au fond tout en leurs imprimant différentes formes d'ondulations. Au fil du temps, les sédiments se sont transformés en roches aux textures ondulées, où les rides se forment sous l'effet des vagues générées par le vent en l'absence de glace à la surface du lac d'une profondeur d'eau n'excédant pas 2 mètres, et qui constituent la preuve la plus évidente de la présence de vagues et d'eau que le rover martien Curiosity a trouvée.

Figure 227 : Forages effectués à Gediz Vallis (Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Le mont « Sharp » est constitué de différentes couches sédimentaires, les plus anciennes se trouvant au bas de la montagne et les plus jeunes au sommet. En montant vers le sommet, le rover a progressé le long d'une ligne temporelle martienne. Ce qui permet aux scientifiques d'étudier comment Mars a évolué d'une planète qui ressemblait davantage à la Terre dans son passé ancien, avec un climat plus chaud et de l'eau en abondance (riche en phyllosilicates), au désert glacial et sec qu'elle est aujourd'hui (riche en sulfates). Après avoir grimpé à plus de 622 mètres au-dessus de la base de la montagne, l'astromobile Curiosity a trouvé des textures rocheuses ondulées préservées dans ce qui est surnommé la « Bande de marquage » faisant partie du membre Chenapau (sous membre Amapari d'une épaisseur d'environ 50 cm) de la formation Mirador. Cette couche de roche est si dure que Curiosity n'a pas réussi à en extraire un échantillon malgré plusieurs tentatives. Les données préliminaires récoltées par les instruments du rover conduisent à présenter cette couche sédimentaire comme résultant d'une couche de cendres volcaniques riche en FeO et MnO (ChemCam et APXS), déposées durant une période

[32] Dark-Toned Halite-Enriched Veins Above the Marker Band Record a Drying Environment in Gale Crater, 16 October 2025

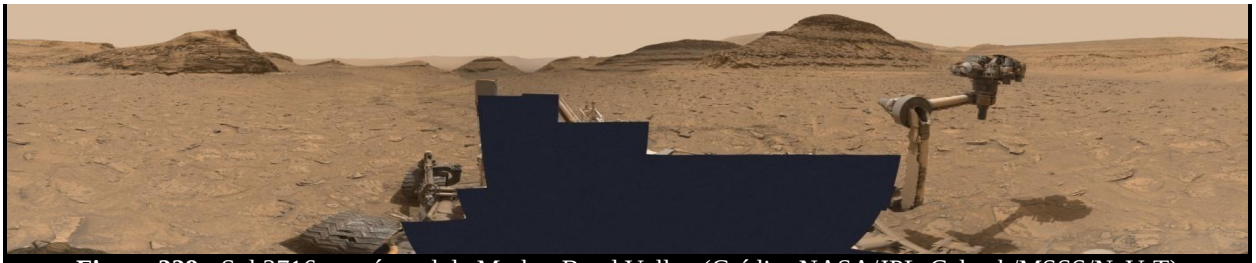


Figure 228 : Sol 3716, entrée sud de Marker Band Valley (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/NeV-T)

martienne marquée par une transition climatique d'un régime humide à un régime sec[33]. Les éléments sensibles à l'oxydoréduction, tels que le fer (Fe) et le manganèse (Mn), peuvent servir de sources d'énergie à la vie sur Terre.

Loin devant la bande de marquage, les scientifiques peuvent voir un autre indice de l'histoire de l'eau ancienne de Mars dans une vallée appelée « Gediz Vallis Channel ». Le vent a sculpté la vallée, mais un canal qui la traverse et qui commence plus haut sur le mont « Sharp » aurait été érodé par une petite rivière laissant un dépôt de type inversé, qui augmente aux files des épisodes d'écoulements. Les scientifiques pensent que des glissements de terrain humides se sont également produits ici, envoyant des blocs et des débris de la taille d'une voiture au fond de la vallée, ces coulées ayant formé la crête « Gediz Vallis Channel » de 70 mètres de haut et de 3,5 kilomètres de long se terminant par le cônes de déjection sédimentaires du fronton « Greenheugh Pediment ». Les zones de dépôts dans « Gediz Vallis Channel » forment le membre de Long Valley, qui fait partie du groupe de Siccar Point dans la stratigraphie du cratère « Gale ». Un autre indice au sein de la bande de marquage qui a fasciné l'équipe est une texture rocheuse inhabituelle probablement causée par une sorte de cycle régulier dans le temps, comme le climat ou les tempêtes de poussière (Figure 225:B). Non loin des textures ondulées, on trouve des roches constituées de couches dont l'espacement et l'épaisseur sont réguliers. Ce type de motif rythmique dans les couches rocheuses de la Terre, provient souvent d'événements atmosphériques se produisant à intervalles périodiques. Il est possible que les motifs rythmiques de ces roches martiennes résultent d'événements similaires, laissant entrevoir des changements dans l'ancien climat de la planète rouge. Les ondulations, les coulées de débris et les couches rythmiques nous indiquent que l'histoire du passage de l'humidité à la sécheresse sur Mars n'était pas simple[34-35].

Le rover reprend la route vers le sud en direction de la butte « Chenapau » (74 mètres de haut) et de l'escarpement « Amapa » avec ses 16 mètres de hauteur le 23 décembre 2022 au Sol 3690. Après avoir parcourus une distance de 191 mètres en 7 séances de roulement quotidien, le rover arrive à l'entrés sud du plateau de la « Bande de Marquage » entre l'escarpement « Amapa » et « Chenapau ». Une troisième tentative de creusé dans la roche très dure à de nouveau échoué quatre semaines plus tard sur le site dénommé « Encanto » (Sols 3715-3721) le 21 janvier 2023 au Sol 3718 (Figure 226). Le dénivelé franchi dans l'acensions des pentes du mont « Sharp » depuis le site d'atterrissage est maintenant rendu à de plus de 640 mètres, et les données orbitales ne voient plus de traces d'hydratation au-delà de 800 mètres d'altitude, mais seulement des traces

[33] Amapari Marker Band Metal-Enrichments: Potential Mechanisms and Implications for Surface and Subsurface Water and Weathering in Gale Crater : 13 April 2026
[34] NASA's Curiosity Finds Surprise Clues to Mars' Watery Past
[35] An Aeolian Depositional Sequence Shaped by Near-Surface Water at the Base of the Layered Sulfate Unit, Gale Crater, 11 May 2026

de dépôts de type éoliens qui ne semble pas avoir été altérés sous l'action de l'eau. Durant cette étape de la mission du rover à travers « Gediz Vallis », l'astromobile Curiosity a franchis en 1 an 5 mois et 16 jours, soit du 7 août 2021 au 23 janvier 2023 (Sols 3200-3720), une distance de plus de 3 351,88 mètres en 520 Sols. L'astromobile poursuit sa redonnée martienne vers le sud toujours à la recherche d'une zone d'échantillonnage en présence de strates riches en sulfate.

Figure 229 : Dust Devils observés au Sol 3250 (Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS)

GEDIZ VALLIS CHANNEL
(Sol 3721 à 4355)

Figure 230 : Cana Dulce et Cacao (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Après avoir effectuée l'étude de la zone de travail du site de la troisième tentative de forage à « Encanto ». Le rover Curiosity reprend la route vers le sud pour se déplacer plus profondément à travers le canyon de « Gediz Vallis Channel » au Sol 3721 le 24 janvier 2023. En court de route l'astromobile s'arrête pour faire l'étude de certaines cibles d'intérêt géologique, comme les météorites de fer-nickel « Cana Dulce » (Sols 3721-3724) et « Cacao » (Sols 3725-3727) d'environ 30 centimètre de diamètre (Figure 230). Mais sur le Sol 3733 après avoir parcourus 96,43 mètres en cinq séances de roulement quotidien (Sols 3721-30), le robot fait demi-tour pour revenir en arrière près de la zone de travail de « Encanto » en parcourant une distance de 91,77 mètres vers le nord, et de 8,41 mètres vers l'est dès le lendemain pour se rapprocher d'une zone présentant plusieurs cibles d'intérêts géologique entre les Sols 3735 et 3744 (du 7 au 17 février au 2023). Le but est de pouvoir récolter un échantillon de poudre de roche à analyser dans la zone de la « Bande de Marquage », pouvant contenir des sulfates de magnésium hydraté, avant de quitter définitivement la région. Sur la figure 231, nous pouvons voir un paysage avec différents reliefs montagneux qui entour le rover Curiosity au Sol 3727, immortalisé par les caméras de la MastCam. En partant de la gauche en allant vers la droite, nous avons l'escarpement « Amapa » (16 mètres de haut) suivit au loin par l'escarpement « Conta », et au centre de la vallée nous retrouvons les buttes « Bolivar » et « Deepdale ». Sur le côté droit de la vallée nous avons au loin une toute petite partie de la butte « Orinoco » (~55 mètres de haut), puis pour couronner le tout nous retrouvons en avant plan à droite du rover la butte « Chenapau » d'une hauteur moyenne de 74 mètres.

Figure 231 : Sol 3727 entre Amapa et Chenapau (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Citation de Daniel alias "vaufrègesI3" extrait de la discussion "Actualités de Curiosity - 2013" du forum AstroSurf : « Le forage du rover comporte six réglages de niveau de percussion pouvant aller jusqu'à 20 fois plus d'énergie que le niveau de base permettant de tapoter doucement jusqu'à cogner vigoureusement dans la roche dure, le tout 30 fois par seconde.

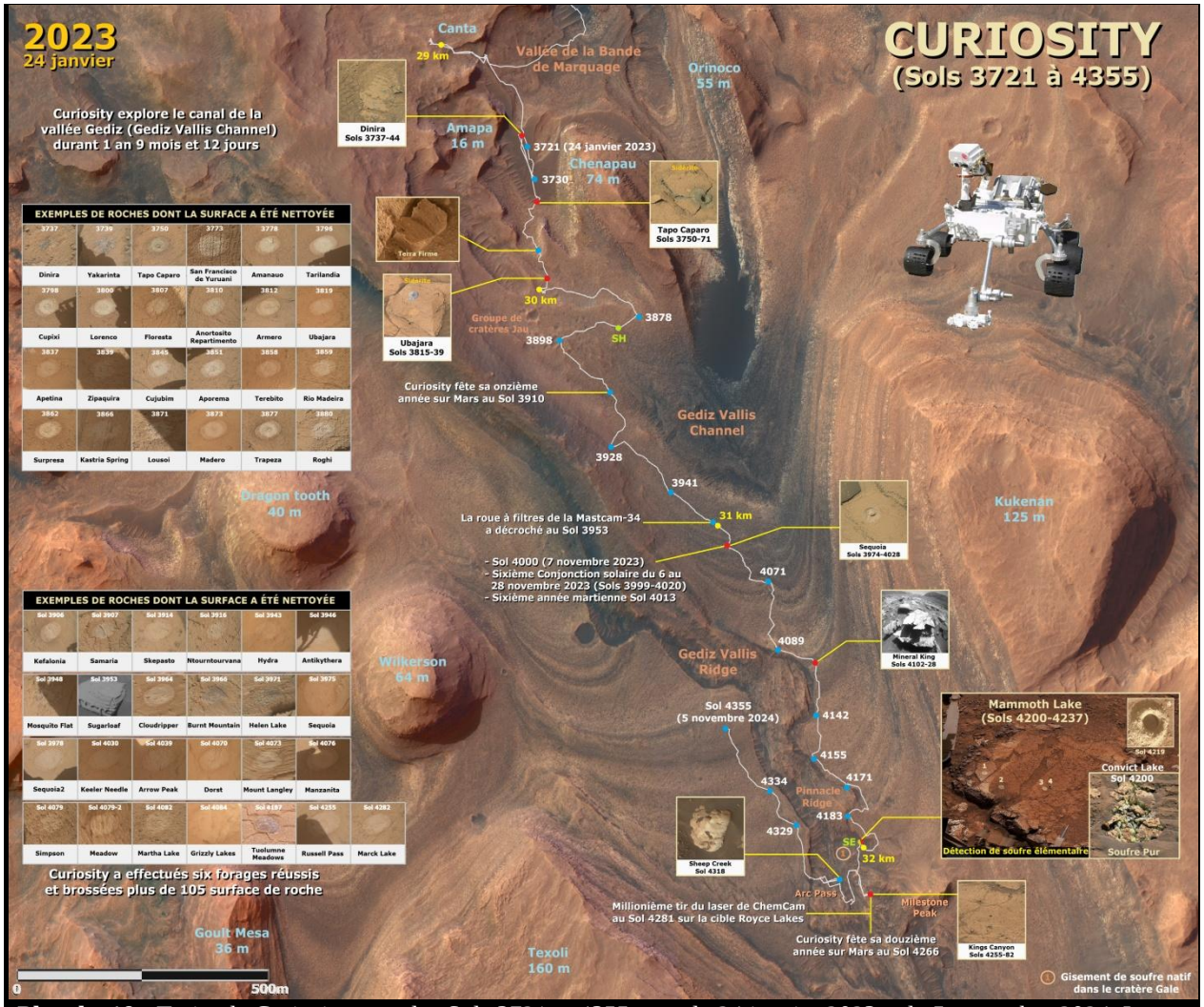


Planche 18 : Trajet de Curiosity entre les Sols 3721 et 4355 entre le 24 janvier 2023 et le 5 novembre 2024. Image de haute résolution obtenu le 5 août 2021 par la caméra HiRISE et par la caméra Context de Mars Reconnaissance Orbiter (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

L'algorithme du pilote de forage commence très bas au niveau un, puis ne se déplace vers un niveau plus élevé que si les progrès de forage sont trop lents. Au début de la mission les forages débutaient au niveau 4 et utilisaient un algorithme qui tendait à conserver ce niveau. Il a ensuite été développé un nouvel algorithme permettant au système de réagir en temps réel aux conditions rencontrées sur un site de forage. L'arbre de décision : l'exercice commence en mode rotatif uniquement. Le rover dispose de capteurs lui permettant de mesurer la vitesse à laquelle le foret pénètre dans la roche. Si le mouvement descendant de l'exercice n'atteint pas un seuil, le rover active les percussions en commençant au niveau le plus bas de 1 (sur 6 niveaux). Sachant que lorsqu'ils se préparent à forer les ingénieurs sur Terre peuvent régler le niveau de percussion autorisé par le rover. La profondeur maximale possible est de 65 millimètres; il s'agit toutefois de minimiser l'utilisation de la percussion tout en générant suffisamment d'échantillon pour la livraison aux instruments des labos, et au-delà pour pouvoir en déverser au sol pour examen ultérieur. Ils atteignent en réalité de 35 à 55 millimètres de profondeur, principalement avec le forage rotatif, et le niveau de percussion maximal n'augmente généralement que très rarement au-delà de 2 (sur 6) avant d'atteindre la profondeur souhaitée. Le foret peut être mis en rotation à une

vitesse comprise entre 0 et 150 tours par minute et que cette vitesse est programmable. En fait ces opérations de forage sont très contraintes. Par exemple elles doivent impérativement se dérouler en journée, et ne peuvent déborder sur le jour suivant : Les températures nocturnes, très basses (avec une amplitude thermique jour/nuit pouvant atteindre 100 °C), provoquent des contractions thermiques du bras robotique. Si le foret restait enfiché dans une roche, le stress exercé par le froid sur le bras pourrait provoquer des tractions aux conséquences graves. Le rover pourrait par exemple se mettre à glisser, la mèche pourrait se vriller dans la roche, etc. Des tests ont déjà été réalisés sur Mars pour quantifier l'influence du stress thermique, et comprendre ce qui se passerait dans une situation ou un dysfonctionnement quelconque interromprait une opération de forage, laissant Curiosity passer la nuit avec son bras prisonnier d'une roche »[36].

Figure 232 : Dinira

Figure 233 : Nodule

(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

L'arbre du foret est en acier et la pointe de coupe en carbure de tungstène, et après 36 forages et plusieurs tentatives échouées pour creuser dans la roche à consistance plus dure, le foret commence à être usé et devient de moins en moins efficace. De plus le moteur qui déplace le foret dans la roche ne fonctionne plus depuis le 2 décembre 2016 (Sol 1537). Curiosity doit désormais utiliser le poids de son bras robotique, afin d'exercer une pression sur le foret pour l'aider à pénétrer dans la roche dure. La production d'énergie (RTG) pour recharger les batteries ayant fortement diminué, et vue que les forages dans la roche dure sont extrêmement énergivore consommant la plus grande partie de l'énergie du robot, surtout si le forage se prolonge et que la percussion est utilisée. Les séances de forages sont désormais planifier sur une plage d'énergie couvrant une grande partie des activités de la journée, et de se reposer durant la nuit pour récupérer de l'énergie et de recharger ses batteries. Malgré toutes les précautions prises pour gérer l'usure et le bon fonctionnement du matériel. La quatrième tentative de forage de la « Bande de Marquage » baptisé « Dinira » (Sols 3737-44), effectué au Sol 3742 le 15 février 2023 à seulement 3 mètres du précédant forage « Encanto » (Sols 3715-3718), fut un nouvel échec (Figure 232), car n'ayant pas atteint la profondeur requise pour obtenir un volume d'échantillon suffisant de poudre de roches pour les labos SAM et CheMin. Il s'agit du quatrième échec consécutif de forage dans la « Bande de Marquage ». Sur le Sol 3744 le 17 février 2023, Curiosity fait de nouveau demi-tours et reprend la route vers le sud en parcourant 97,17 mètres en roulant sur un socle rocheux plat recouvert par endroit de nodules (Figure 233).

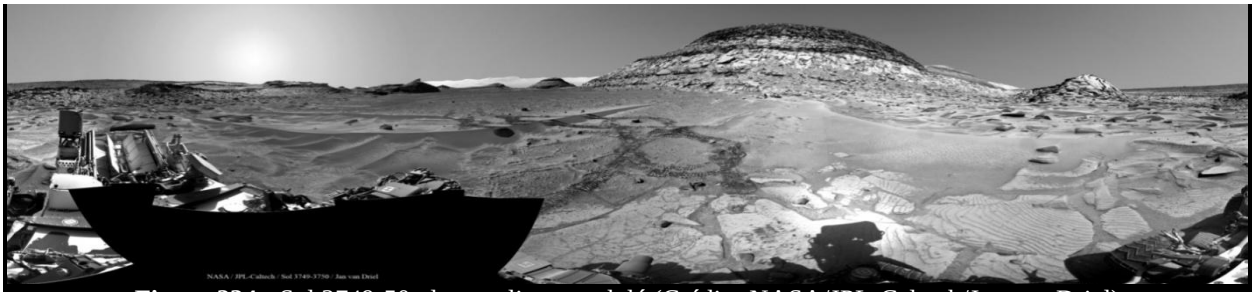


Figure 234 : Sol 3749-50, dune et litage ondulé (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

[36] The Planetary Society : 'Curiosity update, sols 2027-2092: Return to drilling at Duluth, sciencing the dust storm', Emily Lakdawalla 29 juin 2018

Après avoir contourné une petite ondulation de dune et parcourus 49,97 mètres en deux séances de roulement quotidien (Figure 234), l'astromobile arrive à la limite sud du terrain plat avec un roulement facile sur le plateau de la « Bande de Marquage » au Sol 3749. Curiosity est maintenant positionné sur un socle rocheux plat présentant un litage remplis d'ondulations sédimentaires, que l'on peut observer dans la partie inférieur droite de la figure 234 avec en arrière plan la butte « Chenapau ». Le panorama est composé de 37 images pris par la caméra de navigation droite (Navcam) du rover.

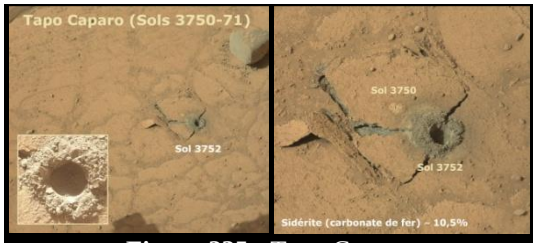


Figure 235 : Tapo Caparo (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Après l'étude de l'éraflure dénommé « Taracua », visible au centre de la figure 234 et laissée par la roue de Curiosity sur le sable ondulé au Sol 3749. La cinquième tentative de forage (37^{iem} forage) de la « Bande de Marquage » baptisé « Tapo Caparo » (Sols 3750-71) a finalement réussie au Sol 3752 le 25 février 2023, et que le rover va étudier durant plus de trois semaines jusqu'au Sol 3771 (16 mars). La dalle de roche d'une teneur en métaux plus faible et d'une teneur en soufre plus élevée s'est fracturée durant le forage, une dalle peu épaisse et très friable (Figure 235). Vue de l'importance de l'échantillon enfin recueillis, l'objectif principal du Sol 3755 est de déposer une partie de l'échantillon de forage dans CheMin, dans le but d'effectuer des analyses minéralogique nocturne aux Sols 3755, 3758, 3764 et 3777, pour un total d'environ 26 heures d'analyse. Un échantillon est également fourni à SAM pour effectuer une expérience d'analyse des gaz évolués par pyrolyse (EGA) au Sol 3762, qui consiste à chauffer l'échantillon à des températures très élevées à environ 850 °C avec une rampe de 35 °C/min, et de mesurer la composition des gaz qui en sortent. Une autre portion de l'échantillon de « Tapo Caparo » est analysée par SAM au Sol 3766, dans le but de faire des analyses chimique avec les différents spectromètres de l'instrument à la recherche de la présence de molécules organiques.

Figure 236 : Sol 3771, après un parcours de 5,52 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Le 22 mars 2023 au Sol 3776, Curiosity se dirige vers l'extrémité sud de la « Bande de Marquage » en se déplaçant et en zigzaguant à travers les blocs rocheux et les ondulations de sable à travers « Gediz Vallis Channel ». La campagne de la « Bande de Marquage » depuis novembre 2022 (Sol 3645), aura totalisée 29 déplacements planifiés du rover totalisant un parcours de 871,35 mètres, 5 tentatives de forage dont un qui a réussi, 4 mosaïques MastCam de 360 degrés et 61 plans d'activités pour une durée de 131 Sols. Une importante mise à jour logicielle est installée sur Curiosity entre le lundi

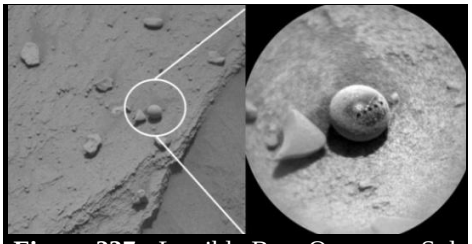


Figure 237 : La cible Bem Querer au Sol 3796, groupement de 5 tirs du laser LIBS (Crédit : NASA/JPL-Caltech/LANL)

Figure 238 : Sol 3815, après un parcours de 240,5 mètres en 15 séances de roulements depuis le Sol 3771, avec en arrière plan la butte Chenapau suivis à droite et plus loin derrière de Kukenan avec ses 125 mètres de haut (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/NeV-T)

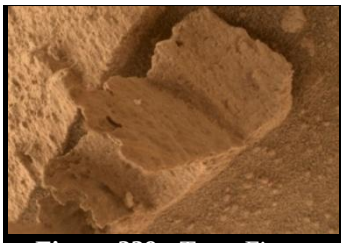


Figure 239 : Terra Firme (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

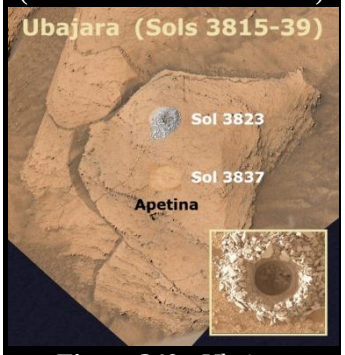


Figure 240 : Ubajara (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ MSSS/NeV-T)

3 et le vendredi 7 avril 2023 (Sols 3788-92). Les modifications apportées au logiciel de navigation depuis 2016 permettront au robot martien de rouler plus vite et de réduire l'usure de ses roues, de pouvoir naviguer de manière autonome pendant un trajet continu, et de mieux manipuler ses différents instruments. La nouvelle version du logiciel va aider à traiter les images plus rapidement, ce qui permettra de passer plus de temps en mouvement et de parcourir des distances plus grandes. Sur le Sol 3800 le 15 avril 2023, le rover rencontre sur sa route une roche sédimentaire de forme étrange baptisé « Terra Firme » donnant l'impression d'un livre ouvert de 2,5 cm de diamètre (Figure 239). L'astromobile grimpe la pente en longeant la petite butte « Owenteik », visible vers le centre de la figure 236 à droite de la butte « Chenapau », et atteint le sommet du petit canyon se trouvant à l'extrémité sud pour quitter définitivement la zone de la « Bande de Marquage » au Sol 3805 le 20 avril 2023. Une semaine après avoir effectué les premières analyses de contact pour évaluer un nouveau site, le 38^{iem} forage de la mission est entamé sur la cible de surface « Ubajara » (Sols 3815-39) au Sol 3823 le 9 mai 2023 (Figure 240). Le laboratoire CheMin a planifié des séances d'analyses de nuit aux Sols 3825, 3827, 3833 et 3841 pour un total d'environ 23 heures d'analyse[37]. Un échantillon est également fourni à l'instrument SAM pour effectuer une expérience d'analyse des gaz évolués (EGA) au Sol 3830. Les analyses peuvent se poursuivre sur une semaine ou deux, selon le type d'analyse effectué par les instruments et du niveau d'énergie disponible. Les analyses effectuées par le spectromètre à diffraction des rayons X de CheMin, ont permis de faire ressortir la présence de sidérite ($FeCO_3$), un minéral de carbonate de fer, à la hauteur de 4,8%. Il s'agit de la deuxième campagne de forage a détecté la présence de sidérite, la première détection avait été effectuée dans les échantillons analysé à « Tapo Caparo » avec 10,5%. Parmi les différents mécanismes ayant pu conduire à la formation des carbonate de fer, est soit une altération de roches volcaniques par une eau acide, des pluies, du gel ou de la neige acide. L'olivine aurait alors donné naissance aux sulfates de magnésium, et les pyroxènes riches en calcium aux sulfates de calcium. Il est également possible que certains dépôts se soient formés comme évaporites suite à l'évaporation d'eau riche en sulfates. Les sulfates se forment généralement en présence d'eau à une époque postérieure à celle des argiles,

[37] Carbonates identified by the Curiosity rover indicate a carbon cycle operated on ancient Mars, Science Vol 388, April 17 2025

Figure 241 : Sol 3851, après un parcours de 75,58 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 242 : Sol 3871, après avoir parcourus 150,39 mètres en 9 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/NeV-T)

quand les volcans étaient plus actifs et la présence d'eau moins constante. Curiosity brosse de nouveau la roche au Sol 3837 le 23 mai 2023, pour éliminer la poussière sur la cible dénommée « Apetina » situé à quelque centimètre sous « Ubajara », afin de laisser une surface propre pour les analyses qui seront effectuées par les autres instruments du rover.

Après avoir passé trois semaines près de « Ubajara », Curiosity reprend la route vers le sud sur un terrain très difficile remplis de gros blocs rocheux, et franchit le même jour le cap de son trentième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars au Sol 3839 le 25 mai 2023. L'astromobile faisant route vers le sud rencontre des petits problèmes d'embourbement, de patinage et de dérapage de ses roues dans le sable entre le 29 mai et le 4 juin 2023 (Sols 3843-3849). Entre temps, le robot brosse et analyse la cible de roche « Cujubim » au Sol 3845 et la cible « Aporema » au Sol 3851, qui se trouve à 11,26 mètres plus au sud, puis le robot réussi finalement à se dégager de l'ensablement le 7 juin au Sol 3851 (Figure 241). L'astromobile reprend la route en empruntant un nouvel itinéraire vers l'est afin de contourner les difficultés rencontrées sur le terrain en pente, roulant à travers une zone d'éboulis parsemé de gros bloc rocheux fracturés et de sable. Trois semaines plus tard après un petit parcours de 13,17 mètres effectué au Sol 3873 en longeant le flanc sud-ouest de « Chenapau », qui permet au robot de finir de gravir la pente (d'environ 13,33 %) et de sortir définitivement du "canyon" (Figure 242). Désormais stationné au sommet de la pente, le rover découvre un paysage chaotique parsemé d'un tapis de roches provenant de zone d'éboulis de la butte « Chenapau », constituées de bandes alternées de roches claires et de roches grises/foncées entrecoupée de petites ondulations de sable. Plusieurs lignes de démarcations de zones d'éboulis sont visibles sur les images sous la coiffe plus résistante se trouvant au sommet des buttes. La coiffe qui recouvre le sommet des buttes résulte d'une couche sédimentaire plus résistante provenant d'un ancien environnement lacustre antique. Un témoignage géologique qui semble indiquer la circulation d'eau sous forme de rivières et de torrents, provenant soit de phase de débâcles ou d'inondation par alternance. Suivit d'érosion éolienne durant des millions, voir même des milliards d'années, et qui ont aidé à

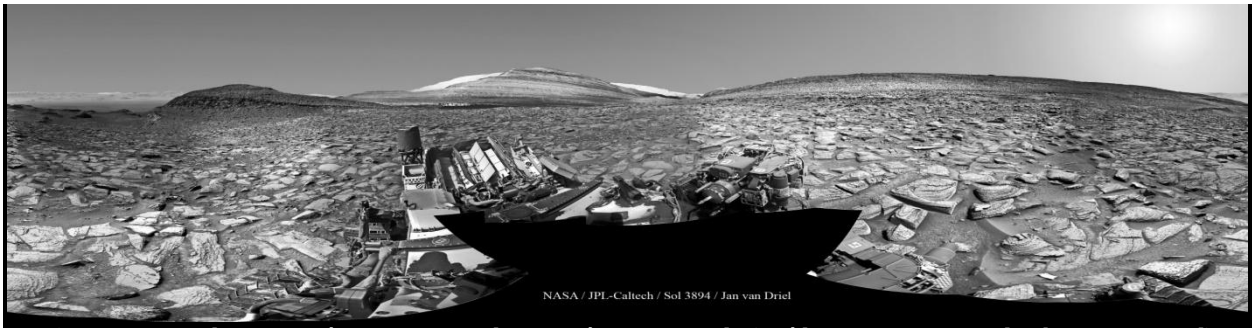


Figure 243 : Sol 3894, après un parcours de 167 mètres en 8 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 244 : Sol 3899, après un parcours de 66,83 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/NeV-T)

la longue à sculpter et à creusé « Gediz Vallis » et la cuvette du cratère « Gale », dont la couche sédimentaire ont encaissant d'énorme variation thermique journalière pouvant fracturer les plus grosses roches. Processus d'érosion qui a favorisé à la longue le décrochage d'une partie des flancs fragilisé des buttes qui borde la vallée, tout en créant des zones propices aux éboulis faisant dévaler les pierres stratifiées en contre bas sur le plancher de la vallée, et qui aurait survenue à plusieurs reprises et à différentes époques dans le passer du cratère « Gale ». Les variations chaotiques et importantes de l'axe de rotation de Mars (obliquité et précession du plan de l'écliptique), ont apporté une alternance de périodes plus chaude et humide aves celles plus sec et aride pouvant durée des dizaines de millions d'années chacune, mais progressivement les périodes sec et aride s'installèrent plus longuement jusqu'à devenir permanentes de nos jour.

Sur le Sol 3880 Curiosity tourne vers l'ouest en direction d'un petit groupe de cratères d'impactes nommé « Jau », et le solstice d'hiver arrive cinq jours plus tard sur le Sol 3885 le 12 juillet 2023. L'astromobile entame une nouvelle vue panoramique avec les caméras de navigation au Sol 3894 (Figure 243), dans laquelle on peut observer la butte « Kukenan » avec ses 125 mètres de haut qui cache le mont « Sharp » en arrière plan. Après l'observation du petit groupe de cratère, le robot entame un nouveau panorama couleur de 360° avec la MastCam au Sol 3899 (Figure 244), puis reprend la route vers le sud. Pour illustrer et documenter le déplacement de Curiosity sur le sol martien durant le trajet effectué entre les Sols 3901 et 4089 du 28 juillet 2023 au 6 février 2024 (Figure 245 à 249), ou le robot franchis une longue distance de plus de 906,29 mètres effectuée en 45 séances de roulement quotidien. L'astromobile va prendre plusieurs images panoramiques avec ses caméras de navigation, qui dévoile le défilement du paysage martien à travers une routes remplis de gros rochers aux arrêtes pointus et tranchantes pouvant menacer l'intégrité des roues du rover. Et durant cette longue route à la recherche d'un nouveau site de forage, l'astromobile a fêté son onzième anniversaire à la surface de la planète Mars au Sol 3910 le 6 août 2023.

Figure 245 : Sol 3904, après un parcours de 48,32 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 246 : Sol 3914, après un parcours de 155,38 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 247 : Sol 3938, après un parcours de 189,82 mètres en 8 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 248 : Sol 3958, après un parcours de 187,94 mètres en 8 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 249 : Sol 4093, après un parcours de 324,83 mètres en 21 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/NeV-T)

La vallée « Gediz Vallis » est une petite entaille située à la base du mon « Sharp » qui mesure environ 9 kilomètres de long sur près de 900 mètres de largeur à son point le plus large, et pouvant atteindre près de 140 mètres de profondeur par endroit. La vallée prend son origine plus haute, et elle semble venir d'une vaste zone d'avalanche, de glissement et d'écoulement de boue et de roches avec infiltration d'eau souterraine qui aurait à plusieurs reprises dévaler les flancs de la montagne. Sur le côté gauche du canal « Gediz Vallis Channel » se trouve le sommet de la crête centrale « Gediz Vallis Ridge », visible dans la moitié droite de la figure 243, qui forme un canal dit "en relief inversé" ou l'érosion a produit une "inversion de relief" de 70 mètres de haut sur 2,5 kilomètres de long, qui se jette en contre bas pour s'étendre à travers « Greenheugh Pediment ». L'inversion topographique se produit lorsque les roches et sédiments transportés dans le lit du chenal sont cimentés ensemble, formant une couche plus dure et de plus en plus épaisse qui résiste mieux à l'érosion. L'érosion éolienne a éliminé les matériaux plus tendres situés à l'extérieur de la crête centrale, laissant l'ancien lit exposé sous sa forme actuelle de « Gediz Vallis Ridge ». Le canal « Gediz Vallis Channel » à érodé et creusé la vallée par des petites rivières, des torrents ou des débâcles à plusieurs reprises, hébergeant même parfois des petits lacs et étangs, qui ont déposé à la longue des sédiments provenant de différentes source, dont des glissements de terrain et des coulées de débris transportant de la boue et des rochers, qui avec le temps (qui se compte en milliard d'année) a formé l'énorme dépôt de teinte plus sombre de la crête centrale « Gediz Vallis Ridge ».

Le système d'imagerie multispectrale de la MastCam de gauche (34 mm) rencontre un sérieux problème sur le Sol 3953 le 19 septembre 2023. La roue à filtres n'est plus positionnée a son réglage standard sur le filtre L0, mais à décroché de sa position et est restée coincée entre les filtres L0 (clair) et L1 (vert) lors de l'exécution d'une séquence d'imagerie multispectrale pour mesurer l'opacité atmosphérique (tau). Ce décrochage de la roue à filtres à pour résultat d'occulter plus de la moitié du champ de vision de l'objectif, obligeant de recadrer chaque images pour faire disparaitre le matériel du système d'imagerie (roue à filtre). En conséquence, la taille des images de la MastCam de gauche ne couvre plus que la moitié de ce qu'elle couvrait auparavant. La caméra demeure toujours utilisable, mais il faut désormais plus d'image et de temps (2,5 fois plus) pour prendre les mosaïques d'images servant à faire les vues panoramiques. L'équipe de la MastCam a envoyé une série de commandes de diagnostic avec différents paramètres d'entraînement du moteur, dans le but de caractériser le problème et de débloquer le filtre pour ramener la roue filtrante à sa position standard. Malgré tout les efforts pour débloquer la roue du système de filtre, celle-ci va rester bloquer durant tout le reste de la mission. Le rover franchis le cap de son 31^{iem} kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars au Sol 3955 le 21 septembre 2023.

Figure 250 : Sequoia (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Sept semaines plus tard, et plus de cinq mois après la dernière campagne de forage, le rover arrive dans une nouvelle zone de travail et se prépare pour la prochaine campagne de forage. Le bras robotique est désarrimé dans le but d'effectué les premières analyses de contact avant forage avec le spectromètre APXS et MAHLI, avant et après le dépoussiérage de la cible avec la brosse DRT. Après avoir effectué le test de précharge, qui consiste à placer le foret de la perceuse en appui contre la surface de la roche, sans activer la rotation, pour voir comment la roche réagit à cette force. Les résultats du test de précharge sont ensuite documentés par la caméra MAHLI. Le 39^{iem} forage dénommée « Sequoia » (Sols

Figure 251 : Sol 4098, après un parcours de 51,81 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Thomas Appéré)

3974-4028) est exécuté au Sol 3980 le 18 octobre 2023. L'instrument CheMin[38] reçois une partie de l'échantillons qui seront étudié durant la nuit sur les Sols 3982 et 3987 pour un total de 15 heures d'analyse, et une autre partie de l'échantillon est également fournis à SAM pour effectuer deux expériences d'analyses des gaz évolués (EGA) aux Sol 3989 et 3995 (avec détection de sidérite à 7,6%). L'astromobile se prépare ensuite à passer à travers la sixième conjonction solaire en mode automatique d'une durée de deux semaines prévue entre le 6 et le 28 novembre 2023 (Sols 3999-4020). Le 4000^{iem} Sol est atteint dès le lendemain le 7 novembre 2023, couronnant ainsi une période d'exploration de la surface martienne de plus de 11 ans et 3 mois avec une distance parcourus de plus de 31 kilomètres. Le rover Curiosity entame sa sixième année martienne à explorer la surface de la planète Mars au Sol 4013. Les communications avec le robot reprennent au Sol 4022 à la sortie de la conjonction solaire, et après avoir étudier durant 52 Sols les environs du site de « Sequoia », l'astromobile reprend la route vers le sud au Sol 4028 le 5 décembre 2023.

Figure 252 : Motifs polygonales (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

L'équinoxe de printemps arrive dans l'hémisphère sud de la planète Mars le 13 janvier 2024 au Sol 4066, marquant le début d'une nouvelle saison potentielle de tempêtes de poussière. Depuis son atterrissage jusqu'au Sol 4068, ChemCam a analysé un total de 4 001 cibles, ce qui a permis d'obtenir 29 486 points d'observation LIBS. Entre les Sols 4064 et 4074, Curiosity travers de nouveau un terrain avec des roches qui présentent des motifs de fractures polygonales à leur surface (Figure 252), interprétées comme des fissures de dessiccation de boue qui se forment lorsque des conditions humides-sèches se produisent de manière répétée pendant de longues périodes. Le robot change de route au Sol 4074, et tourne plein sud pour se diriger vers le sommet de la crête centrale « Gediz Vallis Ridge », que l'astromobile rejoint au Sol 4089 le 6 février 2024 après avoir parcourus 157,67 mètres en 7 séances de conduite sur le sol martien. Sur la vue panoramique de la figure 251 pris au Sol 4098 donnant sur l'horizon ouest, on peut voir la colline « Kukenan » à gauche, suivit de « Texoli » vers le centre, et à droite on commence à voir émerger le sommet de la butte « Wilkerson » de 64 mètres de hauteur.

Quatre mois après avoir effectué le dernier forage sur Mars (« Sequoia » au Sol 3980), et parcourus une distance de 78 mètres exécuté en 4 séances de conduite sur le sol martien depuis le

[38] The Chemistry and Mineralogy (CheMin) X-ray Diffractometer on the MSL Curiosity Rover: A Decade of Mineralogy from Gale Crater, 29 May 2024

Figure 253 : Mineral King (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Sol 4094. Le robot se positionne dans une nouvelle zone de travail au Sol 4102 le 19 février 2024 et se prépare pour la prochaine campagne de forage. Les roues du rover étant suffisamment stables sur le terrain, le bras robotique est désarrimé afin de permettre aux différents outils d'effectué leur tâche et leurs analyses préliminaires. Après avoir vérifié la stabilité et la résistance de la roche finement laminée (plus la roche est résistante, moins elle risque de se fracturer ou de se déplacer), la quarantième campagne de forage dénommée « Mineral King » (Sols 4102-4128) est exécuté sur un gros bloc stratifié et nodulaire au Sol 4107 le 24 février 2024 (Figure 253). Cependant la partie de l'échantillon donner a SAM n'était pas suffisante pour mener une expérience de gaz évolué (EGA), un deuxième forage appelé « Mineral King2 » est donc planifié et exécuté au Sol 4125 très proche à environ 20 cm à droite du premier, mais ce fut un nouvel échec. Après avoir étudié les environs du site de « Mineral King », l'astromobile reprend la route vers le sud au Sol 4128 le 17 mars 2024.

Lors de séquence de déplacement de longue durée sur le sol martien, le robot est programmé pour prendre en charge les déplacements et les activités scientifiques sur une période de deux jours, il s'agit d'une séquence de planification familière "touch and go". Dans ce type de plan, l'astromobile est programmé selon une séquence planifiée pour effectuer les activités scientifiques de contact et la conduite sur le premier Sol, puis le robot passe le second Sol à effectuer des observations scientifiques non ciblées. Durant le trajet vers le sud, l'astromobile rencontre sur sa route un champ du bloc rocheux stratifié de teinte plus clair au Sol 4155 le 14

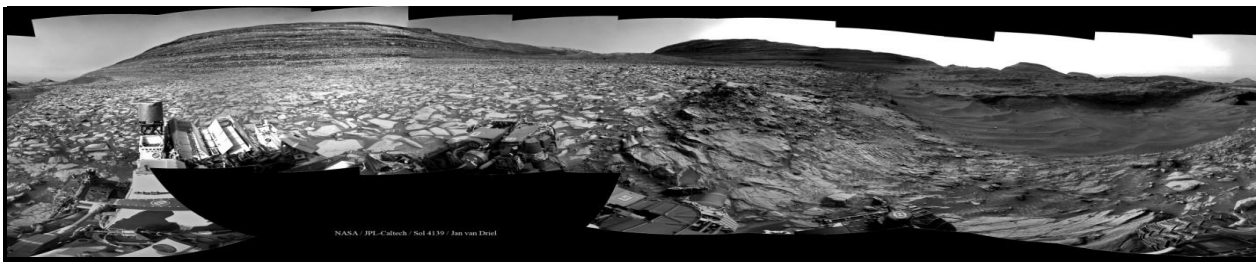


Figure 254 : Sol 4139, dans la partie droite de l'image, la butte Dragtooth de 40 mètres de haut situé à droite de Wilkerson qui commence à émerger sur la ligne d'horizon (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

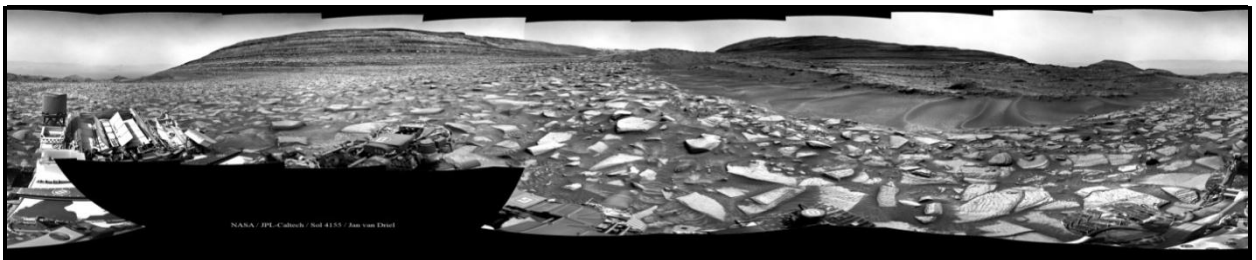


Figure 255 : Sol 4155, après un parcours de 102,95 mètres en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

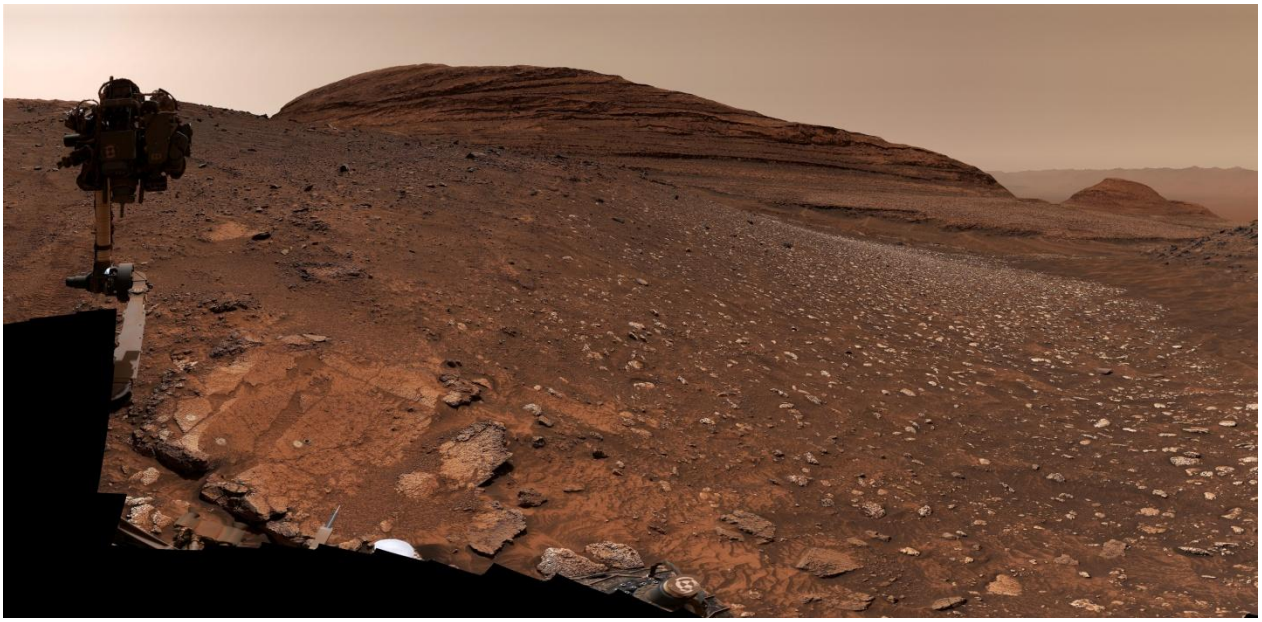


Planche 19 : Panorama couleur au Sol 4220, campagne de Mammoth Lake 2 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

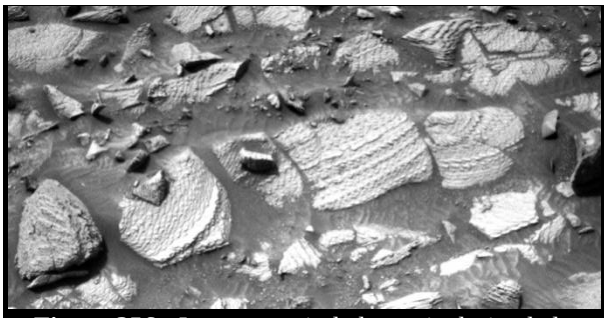


Figure 256 : Image extrait de la partie droite de la figure 255, situé sous le champ de dune du côté droit (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

avril 2024 (Figure 255). Leur surface présente une texture ondulée avec des motifs vertigineux qui ressemble à des "écailles de dragon", dont la cible « Sawblade » (Figure 256, premier bloc de teinte claire à gauche de l'image). Après avoir parcourus 84,63 mètres en 5 séances de conduite en longeant la crête « Gediz Vallis Ridge ». Le rover arrive à la hauteur de l'escarpement « Pinnacle Ridge » au Sol 4169, qui fait partie de « Gediz Vallis Ridge », et prend le temps d'étudier quelques roches atypique qui se trouve au alentour, comme la roche sombre « Bilko Pinnacle » au Sol 4171. Curiosity poursuit sa route parallèlement au canal et contourne par le nord-est l'escarpement « Pinnacle Ridge » entre les Sols 4176 et 4183 (Figure 257 et 258), pour ensuite se diriger plein sud en direction d'un point de passage situé entre les buttes « Texoli » et « Wilkerson », dans l'espoir de rejoindre de nouvelles cibles qui se trouvent encore plus loin vers le sud. Le rover parcours ensuite avec prudence une distance de 85,78 mètres effectué en 4 séance de roulement quotidien jusqu'au Sol 4191, ou l'astromobile descend dans une petite dépression. Il s'agit d'un passage obliger pour se rendre de l'autre côté du « Gediz Vallis Channel », afin de se diriger vers la mystérieuses formation rocheuse en en forme de toile d'araignée baptisée « Bosworks », qui se trouve plus loin vers le sud-ouest de l'autre côté de « Texoli ». Deux jours plus tard, Curiosity franchit le cap de son trente-deuxième kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars au Sol 4197 le 27 mai 2024.

En longeant le site de « Whitebark Pass » sur le Sol 4200 le 30 mai 2024 (Figure 261 et Planche 19), qui contient un gisement de dépôt de pierres claires composée de soufre natif dans le cratère « Gale » provenant vraisemblablement des débris d'avalanche. Le rover écrase accidentellement une petite pierre blanche vésiculaire dénommée « Convict Lake » qui se trouvait sur sa route, et qui ressemble beaucoup à une éponge (Figure 262). Le spectromètre à

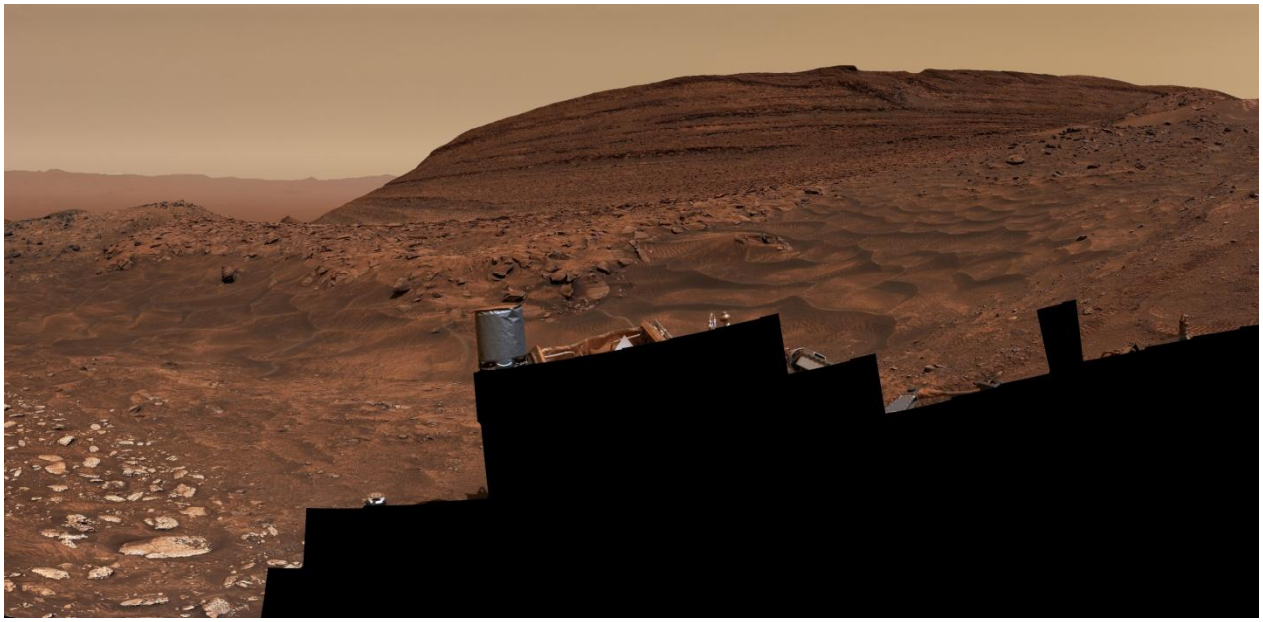


Planche 19 : Suit du panorama couleur au Sol 4220, Mammoth Lake 2 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

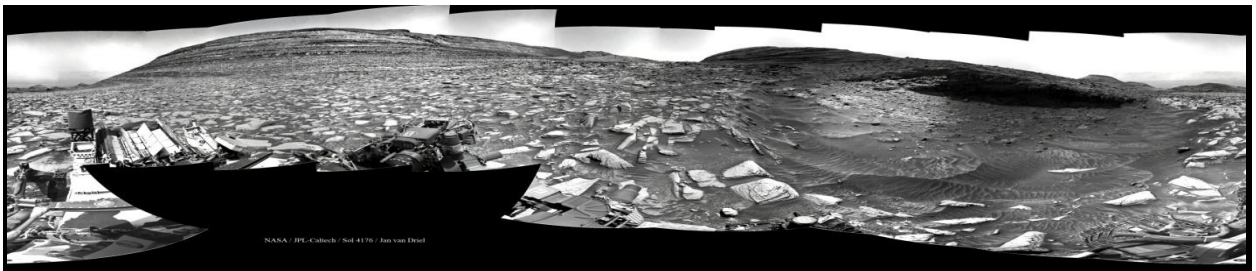


Figure 257 : Sol 4176, l'escarpement Pinnacle Ridge (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 258 : Sol 4183, après un parcours de 81,72 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 259 : Sol 4190, après un parcours de 55,57 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

rayons X à particules alpha (APXS) de Curiosity a révélé que les cristaux vert jaunâtre dans la roche observé par la caméra Mastcam était composée de soufre élémentaire, c'est la première fois

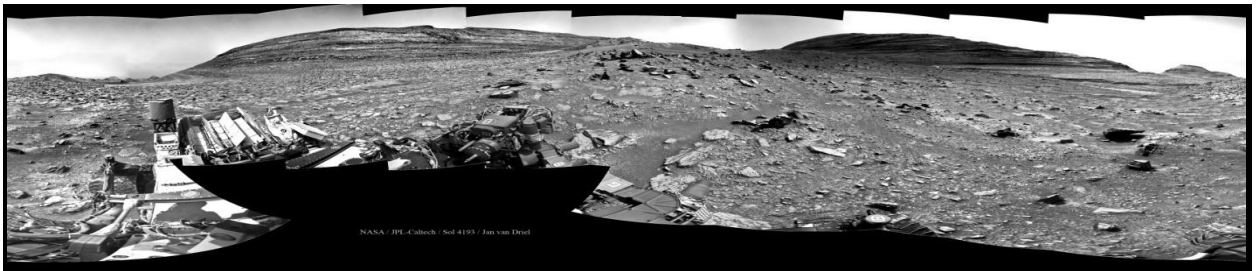


Figure 260 : Sol 4193, après un parcours de 39,87 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 261 : Sol 4200, après un parcours de 47,89 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

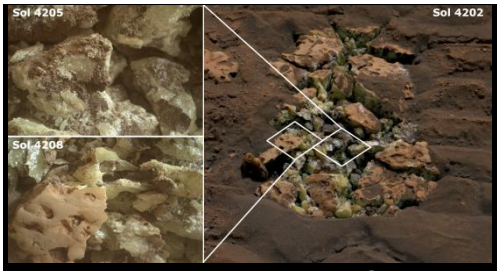


Figure 262 : Convict Lake
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

que ce type de soufre est trouvé sur la planète rouge. Sur Terre nous le trouvons principalement dans des endroits comme les processus volcaniques ou dans les cheminées hydrothermales chaudes ou froides. La présence de soufre natif suggère l'existence d'un processus d'enrichissement en soufre impliquant des fluides souterrains ascendants. La phase soufrée dominante recontrée dans diverses roches et sol à la surface de Mars, sont les ions de soufre oxydés ou sulfate (SO_4^{2-}). Les ions de soufre réduits ou sulfure (S^- ou S^{2-}) sont présents dans certains échantillons martiens et représentent un composant mineur de certains matériaux de surface. Le soufre pur ou natif[39] à l'état d'oxydation neutre (S^0 ou S_2O), n'a été identifié jusqu'à maintenant dans aucun matériau martien. Sur Terre, le soufre élémentaire se forme généralement dans des régions volcaniques ou hydrothermales à très haute température, dont aucune trace n'a été observée à l'intérieur du cratère[40].

Vue du grand intérêt géologique qu'offre la zone de travail qui présente une grande variété de roches, et après avoir effectuées trois mesures de fluorescence X avec l'instrument APXS sur la pierre claire « Snow Lakes » au Sol 4202. La quarante-unième campagne de forage est amorcée, et trois séances de brossages de l'affleurement « Mammoth Lake » (riches en silicates) avec l'outil de dépoussiérage (DRT) sont programmées à des endroits différents (Sols 4205, 4209 et 4212). Entre temps le solstice d'été fait son entrée dans l'hémisphère sud de la planète le 8 juin 2024 (Sol 4209). Le test de précharge permet de vérifier la stabilité de la roche, de s'assurer qu'elle ne bouge pas et qu'elle ne risque pas de se fracturer sous la pression de la foreuse. Il s'agit d'un test très important ! Par exemple, si la roche se fracturait, le bras pourrait glisser vers le bas de manière inattendue. Il faut donc s'assurer que le bras peut contrôler de manière adéquate l'orientation de la foreuse au fur et à mesure qu'elle progresse dans la roche.

[39] NASA's Curiosity Rover Discovers a Surprise in a Martian Rock, July 18, 2024
[40] A native sulfur deposit in Gale crater, Science 28 Jun 2026

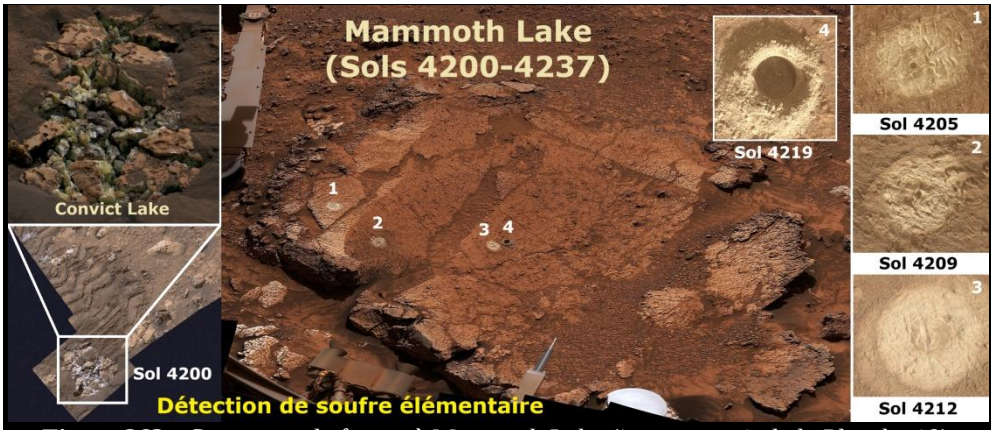


Figure 263 : Campagne de forage à Mammoth Lake (image extrait de la Planche 19) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS & NeV-T)

Figure 263 B : Snow Lakes, Palisade Glacier et Lake Dorothy (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

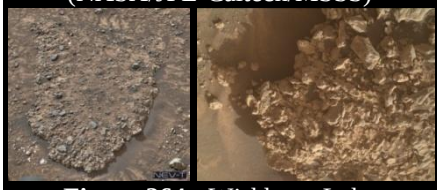


Figure 264 : Wishbone Lake (NASA/JPL-Caltech/MSSS & NeV-T)

Figure 265 : Kings Canyon (NASA/JPL-Caltech/MSSS & NeV-T)

Malheureusement, le test de précharge a échoué (Sol 4214). Cependant, cet espace de travail est très intriguant, c'est pourquoi les planificateurs du rover ont trouvé un deuxième endroit sur la même dalle rocheuse situé à environ 6 centimètres du premier test, pour effectuer un nouveau test de précharge au Sol 4216 qui cette fois à bien réussit. La séance de forage sur la cible « Mammoth Lake » (Sols 4200-4237) est exécuté trois jours plus tard sur le Sol 4219 le 19 juin 2024 (Figure 263). L'expérience EGA de SAM réalisée sur une partie de l'échantillon chauffé de « Mammoth Lakes 2 » au Sol 4226, a permis de mesurer la composition des gaz à l'aide du spectromètre à laser accordable (TLS) et du spectromètre de masse quadripolaire (QMS). L'équipe a donc prévu d'introduire une nouvelle pincée d'échantillon dans l'un des fours de SAM au Sol 4230, et de mesurer la composition des gaz libérés à l'aide du chromatographe en phase gazeuse (GC) et du spectromètre de masse quadripolaire (GC-MS). En réalisant ces deux expériences, nous auront une meilleure compréhension des matériaux présents dans cette roche. Cette observation marque la première découverte de ce minéral à l'état pur sur Mars, pouvant résulter de divers processus géologiques reliée à l'activité volcanique et hydrothermale (impacts ou aux fluides magmatiques). Bien que l'on associe souvent le soufre à l'odeur des œufs pourris (résultant du sulfure d'hydrogène gazeux), le soufre élémentaire est inodore. Ces sulfates (sel à base de soufre) laissé par l'assèchement des eaux correspondent à des épisodes de forte salinité due à la cristallisation précoce de saumures lors du dépôt des sédiments, ou au début de l'enfouissement de ceux-ci, par évaporation progressive de l'eau liquide présente dans le milieu. Pour documenter la zone de travaille, un vaste panorama couleur de 360 degrés de la MastCam composé d'une mosaïque de 336 images individuelles est entamé au Sol 4220 le 20 juin 2024 (Planche 19).

L'astromobile reprend la route vers le sud au Sol 4237 en direction du point de traverse de « Gediz Vallis Channel » dénommée « Arc Pass » à la recherche d'un nouveau site de forage. Le

Figure 266 : Sol 4264, Kings Canyon (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/NeV-T)

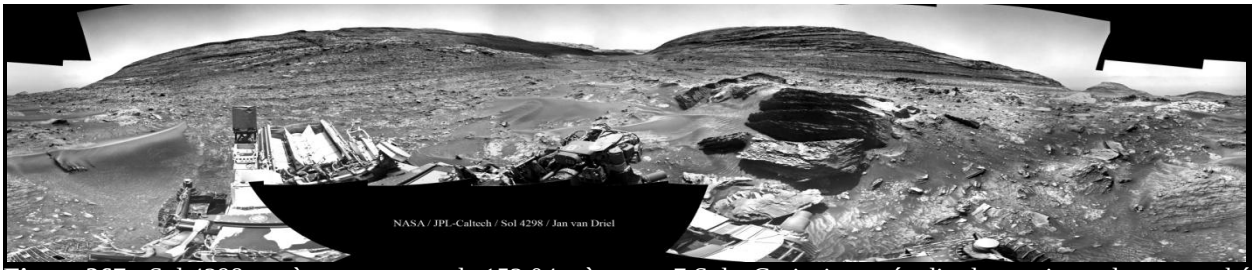


Figure 267 : Sol 4298, après un parcours de 152,04 mètres en 7 Sols. Curiosity va étudier les environs du gros roché sombre Tungsten Hills (vers le centre) jusqu'au Sol 4301 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

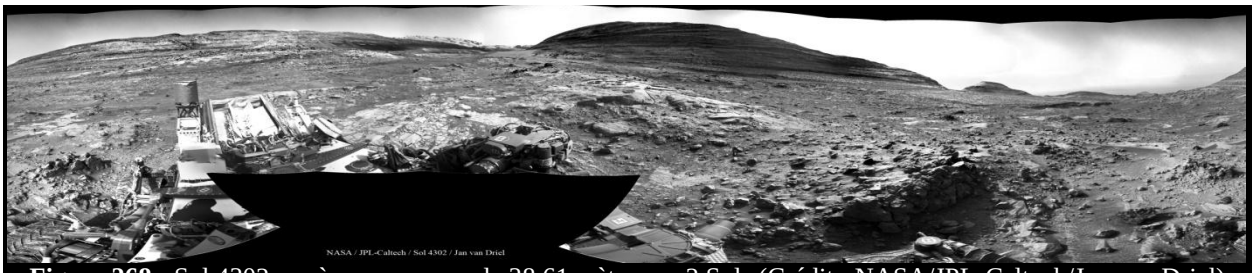


Figure 268 : Sol 4302, après un parcours de 38,61 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 269 : Sol 4312, après un parcours de 87,37 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 270 : Sol 4319, après un parcours de 105,58 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

long du trajet Curiosity rencontres deux nouvelle roches de teintes claire hautement poreuse composées de souffre pure, soit « Palisade Glacier » au Sol 4239 et « Lake Dorothy » au Sol

Figure 271 : Sol 4352, après un parcours de 341,16 mètres en 13 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/NeV-T)

4240 (juillet 2024) que le robot analyse avec l'APXS (Figure 263 B). Encore plus loinle le long de sa route, le robot rencontre la roche « Wishbone Lake » entre les Sols 4241 et 4244, un conglomérat constitué de galets cimentés par un matériau matriciel à grain fin (Figure 264). Curiosity parcourt une distance de 65,95 mètres entre les Sols 4244 et 2455 effectué en 3 séances de conduite quotidienne, avant d'arriver sur le prochain site d'échantillonnage situé dans une zone de roches aux tons plus clairs. L'astromobile étudie et prépare le terrain durant une semaine avant d'exécuter le 43ème forage de la mission sur la cible « Kings Canyon » (Sols 4255-4282) au Sol 4263 le 3 août 2024 (Figure 265, et 266 sous le bras du rover à droite). Le robot a étudié cinq pierres claires dominés par un pic important de soufre, données mesurées à l'aide du spectromètre à rayons X à particules alpha (APXS) de Curiosity vers la fin de la campagne effectuée à « Gediz Vallis Channel ».

Figure 272 A : Phobos/Terre

Figure 272 B : Sheep Creek (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

L'astromobile fête sa douzième année à explorer la surface de la planète Mars sur le Sol 4266 le 6 août 2024. Une expérience de gaz évolué de SAM (EGA) a été réalisée durant la nuit au Sol 4270, et une expérience GC-MS (Gas Chromatograph and Mass Spectrometry) est planifiée sur l'échantillon de forage entre les Sols 4273 et 4274 (13 et 14 août 2024). SAM est l'instrument le plus complexe jamais utilisé dans une mission d'exploration planétaire, et l'expérience GC-MS est une activité qui consomme beaucoup d'énergie. C'est pourquoi il faut la planifier d'avance pour principalement recharger les batteries, et de préparer le nettoyage de la colonne du chromatographe en phase gazeuse (GC) de SAM à haute température. Les trois dernier Sols de la campagne de forage (Sols 4280 et 4281-82) sont utilisés pour obtenir des données APXS sur les résidus situés autour du trou de forage, et sur une nouvelle surface brossée sur la cible « Marck Lake ». Le millionième tir du laser de ChemCam est également exécuté sur le même Sol sur la cible « Royce Lakes ». Le robot reprend la route vers le nord dans l'objectif de trouver un endroit pour traverser (« Arc Pass ») le petit canal d'environ 280 mètres de largeur avec un dénivelé d'environ 40 mètres[41], et de monter sur l'autre rive pour poursuivre sa mission

[41] Late-Stage Debris Flows Eroded Aeolis Mons in Gediz Vallis, Gale Crater, 17 June 2026

vers la région fracturé « Bosworks ». Curiosity a utilisé sa caméra MastCam pour immortaliser une vue du ciel nocturne martien, montrant une conjonction entre la levé de la lune Phobos se trouvant à proximité de la Terre se couchant sous l'horizon au-dessus de la butte « Texoli » au Sol 4295 le 5 septembre 2024 (Figure 272:A). C'est la première fois qu'une image simultanée de ces deux corps célestes est prise depuis la surface de Mars. L'image historique est une composition de cinq poses courtes et de douze poses longues, toutes prises le 5 septembre 2024.

Curiosity entame la traverse du lit sableux de l'ancien canal à partir du Sol 4296, et arrive sur l'autre rive au Sol 4321 le 2 octobre 2024 (Figure 267 à 270), avant de repartir vers le nord-ouest au Sol suivant. Parmi les roches étudiées durant le parcourt, il y a la roche blanche « Sheep Creek » présentant des cavités entre les Sols 4316 et 4319 qui est semblable à celle que le robot à écrasée au Sol 4200, et qui a permis de faire la découverte du soufre pur (Figure 272:B). La traversé du col « Arc Pass » aura durée plus de 130 Sols (Sols 4191-4321) à explorer les dépôts de coulées de débris, de glissements de terrain et d'avalanches rocheuses. L'astromobile poursuit sa route vers le nord-ouest au Sol 4323 et parcours 316,12 mètres en quatorze séance de roulement jusqu'au Sol 4355 le 5 novembre 2024 (Figure 271). Le rover est maintenant positionné sur le plateau faisant face à la direction de sa prochaine aventure sur Mars, prêt pour se déplacer vers l'ouest entre les buttes « Wilkerson » de 64 mètres de haut et « Texoli », une longue butte d'environ 160 mètres de hauteur. Le relief montagneux causera quelques difficultés pour les communications directes avec le Terre ou entre le rover et les Orbiteurs.

Vers Bosworks
(Sol 4356 à 4848)

Figure 273-74 : Nuages au Sol 3075 et 4399
(Crédit : NASA/JPL/Caltech/Don Davis)

L'aventure de Curiosity se poursuit sur le Sol 4356 le 6 novembre 2024 sur un nouveau chemin faisant cap vers l'ouest. Le robot s'éloigne de « Gediz Vallis » le lendemain au Sol 4357 en roulant en marche arrière pour faciliter les communications avec la Terre et les orbiteurs, dans le but de se diriger prudemment vers un passage situé entre les buttes « Wilkerson » et « Texoli ». L'objectif principal de cette partie de la mission est situé plus au sud de l'autre côté du flanc ouest de la butte « Texoli » de 160 mètres de haut. Il s'agit d'un terrain fortement fracturé dénommé « Bosworks » (Planche 20) qui présente un motif en forme de toile d'araignée qui s'étendent sur des kilomètres à la surface de Mars. Le rover parcours une distance de 45,1 mètres en deux séances de roulement quotidien, puis se remet à conduire en marche avant au Sol 4362. Curiosity franchit le cap de son 33ème kilomètre parcourus à la surface martienne au Sol 4369 le 20 novembre 2024. L'astromobile poursuit sa randonnée au Sol 4389, qui signe la sorti officiel du canyon « Gediz Vallis », et parcours une distance de 241,16 mètres en 7 séances de roulement quotidien depuis le Sol 4369, avant d'arriver au pied du flanc nord de la butte « Texoli ». Et à partir du Sol 4417 le 8 janvier 2025, après avoir effectué un nouveau parcours de 158,32 mètres en six séances de conduite, le rover tourne vers le sud-ouest pour entamer le contournement de « Texoli » (Figure 275 et 276).

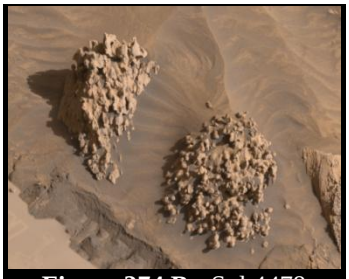


Figure 274 B : Sol 4478
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le rover arrive à la hauteur de deux petits cratères imbriqués peu profond au Sol 4429 d'environ 20 mètres de diamètre dénommée « Rustic Canyon » et « Runyon Canyon », que le robot va par la suite étudier durant trois jours jusqu'au Sol 4432. Curiosity qui roule entre les buttes « Texoli » et « Gould Mesa » (Figure 279 à 282) franchit le cap de son 34ème kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars au Sol 4473 le 7 mars 2025. Par la suite l'astromobile rencontre sur sa route les roches très étranges (conglomérat) « Manzana Creek » et « Palo Comado » au Sol 4478 (Figure 274:B), des roches qui

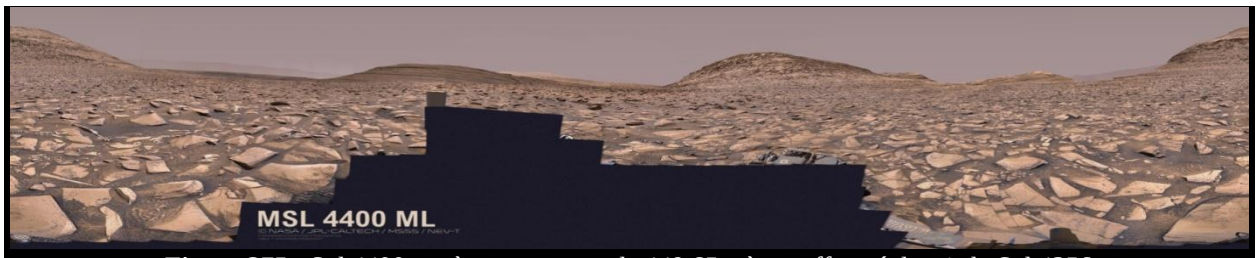


Figure 275 : Sol 4400, après un parcours de 449,65 mètres effectué depuis le Sol 4356
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

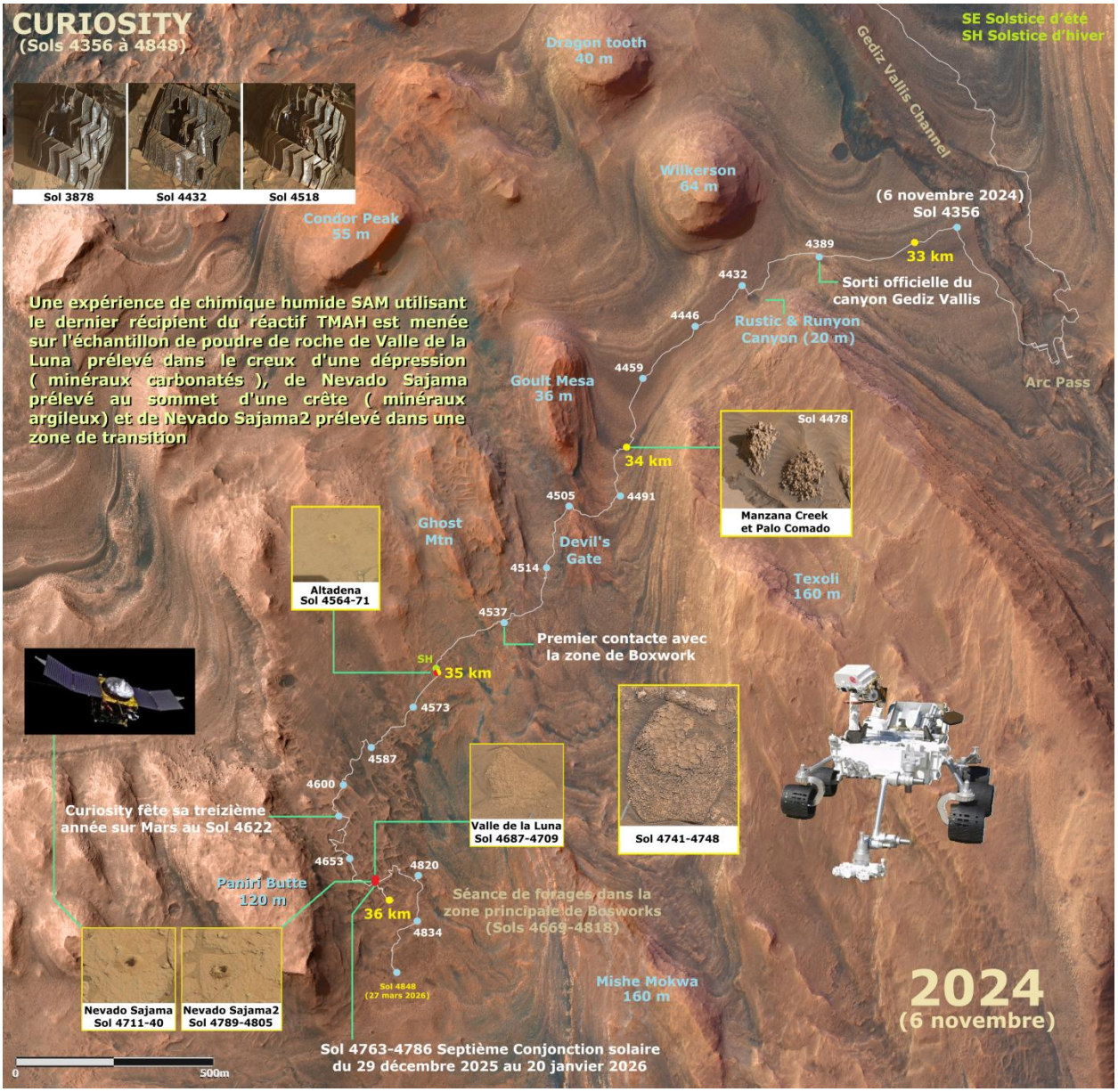


Planche 20 : Trajet de Curiosity entre les Sols 4356 et 4848 entre le 6 novembre 2024 et le 27 mars 2026. Image de haute résolution obtenu le 5 août 2021 par la caméra HiRISE (High-Resolution Imaging Science Experiment) et par la caméra Context de Mars Reconnaissance Orbiter (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

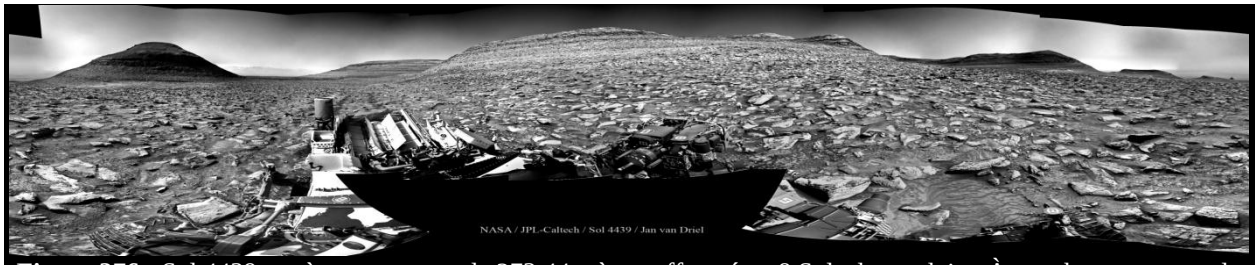


Figure 276 : Sol 4439, après un parcours de 273,44 mètres effectué en 8 Sols de conduite. À gauche nous avons le flanc sud de la butte Wilkerson (64 mètres de haut), suivit au loin par Kukenan dont la grande partie est caché par la façade nord de Texoli (160 mètres, au centre de l'image) avec le sommet de Goult Mesa qui commence à émerger et vers ou se dirige le rover, et à droite nous retrouvons la butte Condor Peak (NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

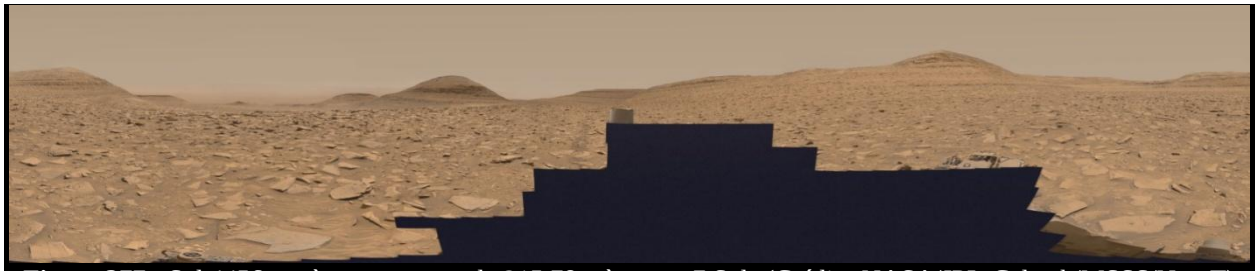


Figure 277 : Sol 4456, après un parcours de 215,78 mètres en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Figure 278 : MAHLI, Dégradation de la roue centre-droit au Sol 3878, 4432 et 4518 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

présente des surfaces irrégulières avec une texture très rugueuse différentes de tout ce que le robot a observé jusqu'à présent au cours de la mission. L'astromobile tourne vers le sud-ouest au Sol 4493 pour contourner le flanc sud de la butte « Goult Mesa », et aussi pour contourner par le nord-est le petite butte « Devil's Gate » entre les Sols 4498 et 4507 (visible au centre de la figure 282). La conduite sur le sol martien n'est pas sans danger, surtout dans des conditions traversées par Curiosity sur un terrain recouvert d'un tapis de gros blocs rocheux aux arrêtes tranchantes pouvant menacer les roues du robot. La conduite doit donc se faire avec beaucoup de prudence, car les roues du rover déjà bien éprouvée ne sont pas à toutes épreuves. L'intégrité des roues du rover est vérifiée à tous les kilomètres environ, et ce travail a été effectué au Sol 4518 le 22 mai 2025 (Figure 278). Pas moins de 5 chevrons sont cassés sur la roue centrale du côté droit, deux de plus qu'au Sol 3878 (4 juillet 2023) comme on peut le voir sur les images de contrôle prise par la caméra MAHLI. Curiosity possède un système de suspension de type rocker-bogie développé en 1988 pour être utilisé par le rover martien Sojourner, et qui est devenu par la suite la conception préférée pour les futurs rovers martien. Le système a été utilisé sur les rovers Spirit et Opportunity en 2003, Curiosity en 2012 et Perseverance en 2018. Les roues de Curiosity sont en aluminium et mesurent 50 cm de diamètre sur 40 cm de large, les éléments de flexion et le moyeu sont en titane. Pour assurer la solidité de la structure, les roues possède 19 nervures ou chevrons en forme de zigzag qui joue un rôle pour renforcer leur stabilité. Une peau d'aluminium ultra-mince de 0,75 millimètre d'épaisseur relit les chevrons, dont le rôle essentiel est d'éviter de trop s'enfoncer dans le sable. On peut remarquer que chaque roue comporte des orifices carrés ou rectangulaires alignés sur trois niveaux. Ces alvéoles codent le message "JPL" en morse dans les traces de roulement, et qui sert de marqueur au système d'odométrie visuel pour mesurer la progression du rover sur le sol martien. Les logiciels du système de navigation analyse chaque image prise par les caméras de navigation à la recherche de ses marques sur le sol pour évaluer la distance parcourus. Les deux roues avant et les deux roues arrière sont dotées de moteurs de direction individuels, en plus des moteurs de traction. Le contrôleur de moteur ne peut entraîner les moteurs de traction en même temps que les moteurs de direction, de sorte que le rover doit s'arrêter chaque fois qu'un ajustement du cap est nécessaire. Chaque roue avant et arrière peut être pilotée indépendamment, permettant au véhicule de tourner sur place. Sur un sol dur et plat le rover peut atteindre une vitesse de 4 cm/s, soit 150 mètres à l'heure, mais le plus souvent en système de navigation autonome (autonav) il a une vitesse moyenne d'environ 1,5 cm/s. Ce qui oblige à mettre plus ou moins longuement le robot en repos à la fin d'un trajet, pour qu'il puisse recharger ses batteries qui s'effectue généralement la nuit.

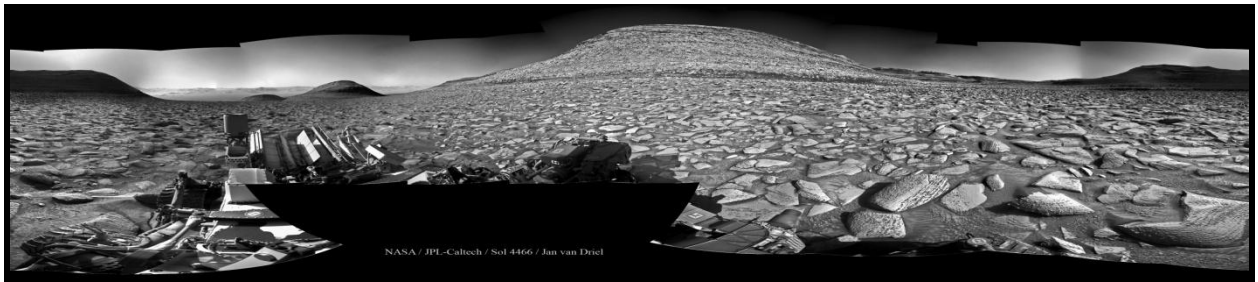


Figure 279 : Sol 4466, après un parcours de 136,95 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

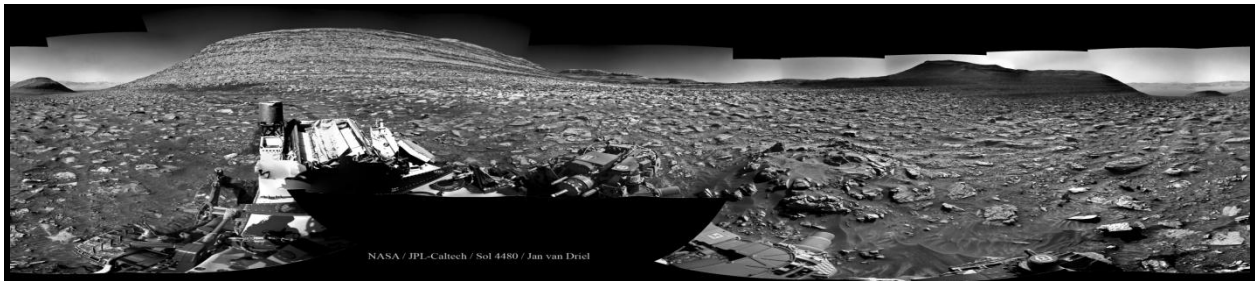


Figure 280 : Sol 4480, après un parcours de 114,22 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

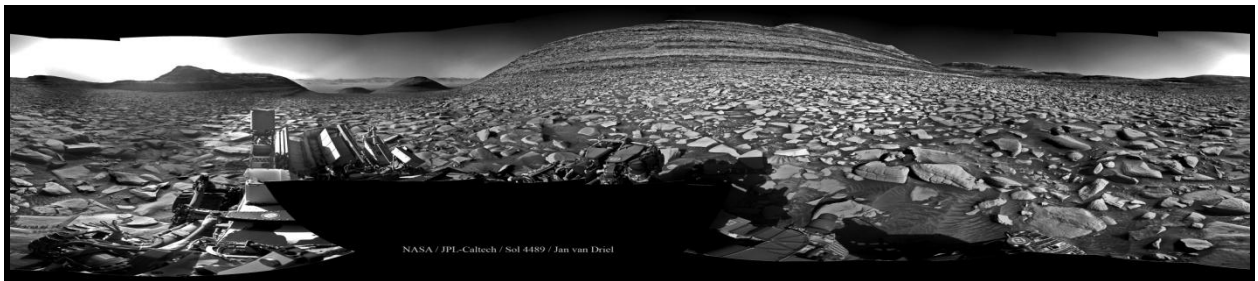


Figure 281 : Sol 4489, après un parcours de 109,4 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

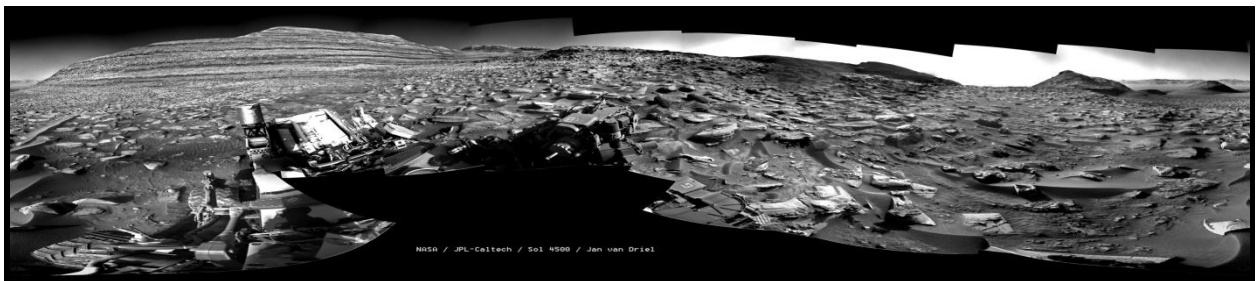


Figure 282 : Sol 4500, après un parcours de 136,25 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

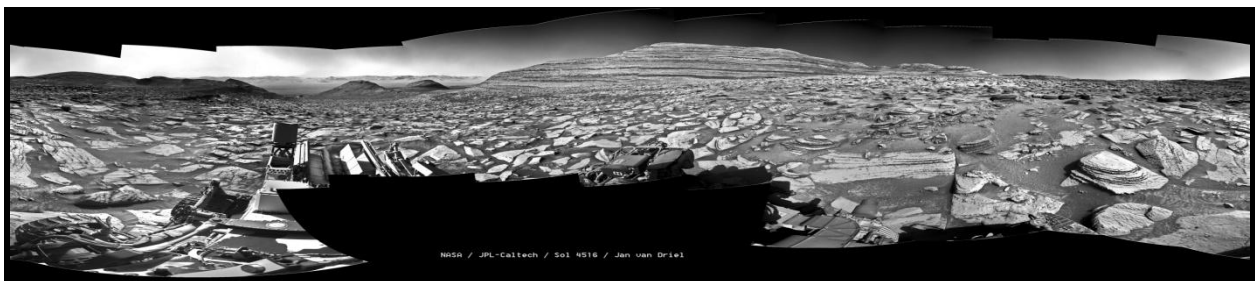


Figure 283 : Sol 4516, après un parcours de 254,14 mètres en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 284 : Sol 4526, après un parcours de 63,79 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 285 : Sol 4537, après un parcours de 130,75 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 286 : Sol 4541, après un parcours de 21,83 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Dans un mois le rover va assister à l'arrive du solstice d'hiver dans l'hémisphère sud de la planète. À cette époque de l'année la calotte polaire sud est dans l'obscurité, tendit que la calotte polaire nord est exposée à la lumière du soleil, ce qui entraîne la sublimation et la libération de vapeur d'eau dans l'atmosphère. La planète Mars étant proche de l'aphélie, qui est la distance maximale entre Mars et le Soleil, l'atmosphère de la planète est généralement plus froide et les hivers dans l'hémisphère sud sont plus long en parallèle avec des étés plus frais dans l'hémisphère nord, dont le solstice d'hiver à lieu au périhélie qui est la distance de l'orbite la plus près du soleil. Pour l'hémisphère nord c'est le contraire qui se produit, les hivers sont plus courts mais plus doux au périhélie, et les été sont plus long mais plus frais étant alors positionnée plus loin du soleil à l'aphélie (situation actuelle). Ces deux facteurs combinés signifient que Mars se dirige vers un temps plus froid, et que l'atmosphère est plus favorable à la formation de nuages crépusculaires composé de glace d'eau et de dioxyde de carbone, il s'agit de nuage de haute altitude situé entre 60 et 80 kilomètres qui sont éclairés par le soleil au levé du jour (Figure 273-4). Durant la saison hivernale, l'alimentation en électricité devient un réel défi, car le rover à besoin de plus d'énergie juste pour se réchauffer en plus de mener à bien ses autres activités et déplacements sur le sol martien.

Curiosity continue sa progression sur un terrain chaotique en tournant vers le sud-ouest au Sol 4527, roulant vers les strates de sulfates stratifiés et un substrat rocheux riche en polygones

Figure 287 : Sol 4558, après un parcours de 212,06 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

en direction de « Bosworks » (Figure 283 à 286), composée d'une série de longues crêtes de 10 à 20 kilomètres de large observées depuis l'orbite. Il s'agit d'une structures en forme de caisson aux arrêtes surélevées qui ressemblent à des toiles d'araignées géantes, ou à des nids d'abeilles s'étendant sur des kilomètres. Ces structures se sont formées lorsque les minéraux transportés par les derniers apports d'eau du mont « Sharp » se sont déposés dans des fractures de roche en surface, puis qui ont durci. Au fur et à mesure que les parties les plus tendres de la roche s'érodaient, il ne restait que les minéraux les plus résistants cimentés dans les fractures, laissant apparaître des fines crêtes de forme géométriques. Le premier contact avec la structure de « Bosworks » (structures en caisson) s'effectue sur le Sol 4537 le 16 mai 2025 (Figure 286) après avoir parcourus depuis le Sol 4527 une distance de 130,75 mètres effectué en quatre séances de conduite sur le sol martien. L'astromobile se déplace maintenant en longeant la partie nord au bas relief de la zone des « Bosworks » (Sols 4537-4848) sur une surface de dépressions peu profondes, parfois remplies de sable, séparées par des crêtes surélevées, et parcours une distance de 212,06 mètres en six séances de roulement entre les Sols 4544-58, avant de s'arrêter devant un nouvel espace de travail. Durant le dernier court trajet de la séquence de conduite précédente sur Mars, le solstice d'hiver a fait son entrée au Sol 4554 le 29 mai, et Curiosity a franchit le cap de son 35ème kilomètre parcourus à la surface de la planète sur le Sol 4558 le 2 juin 2025 (Figure 287).

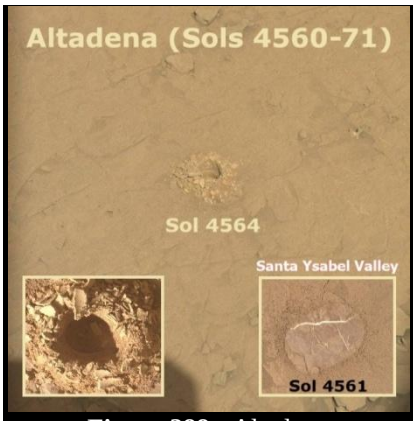


Figure 288 : Altadena

Figure 289 : Laguna del Bayo (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

La cible « Holcomb Valley » est dépoussiérage avec la DRT au Sol 4559, puis le robot se déplace de 3,84 mètres plus loin pour se positionner devant un nouvel affleurement qui présente un plus grand intérêt. Le rover se préparer ensuite à effectuer la 43^{iem} campagne de forage, en nettoyant la surface de la cible « Santa Ysabel Valley » au Sol 4561, dévoilant un réseau de veines blanches transversales de sulfate de calcium qui étaient cachées sous la poussière, vestige de dépôts ancien laissés par une intrusion d'eaux souterraines dans la roche. Après avoir passé avec succès le test de précharge au Sol 4562, pour s'assurée de la stabilité de la roche et de détermine si les forces exercées sur la foreuse sera suffisantes pendant le forage. Le premier forage effectué dans la zone de « Bosworks » (Figure 288) est exécuté au Sol 4564 le 8 juin 2025 sur la cible baptisée « Altadena » (Sols 4560-71). Le site d'échantillonnage est situé à une altitude de 854 mètres plus haut par rapport au site d'atterrissage. Chaque trou de forage ouvre une fenêtre sur le passé et peut aider à comprendre l'évolution de l'environnement et du climat martiens. Après avoir livré avec succès des échantillons de roche

Figure 290 : Sol 4571, après un parcours de 51,03 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

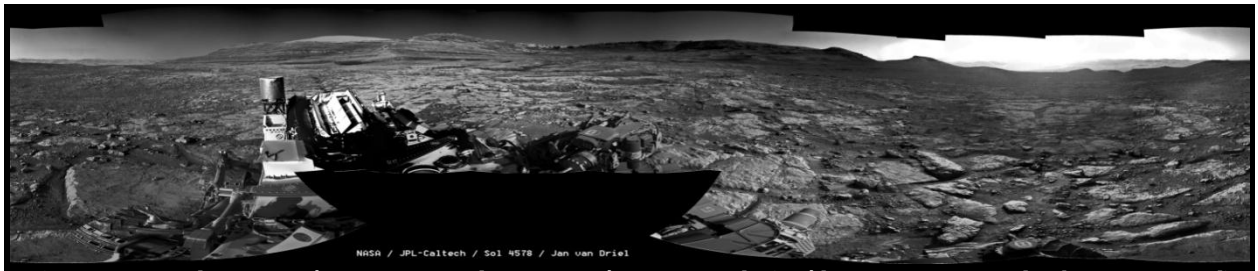


Figure 291 : Sol 4578, après un parcours de 132,68 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

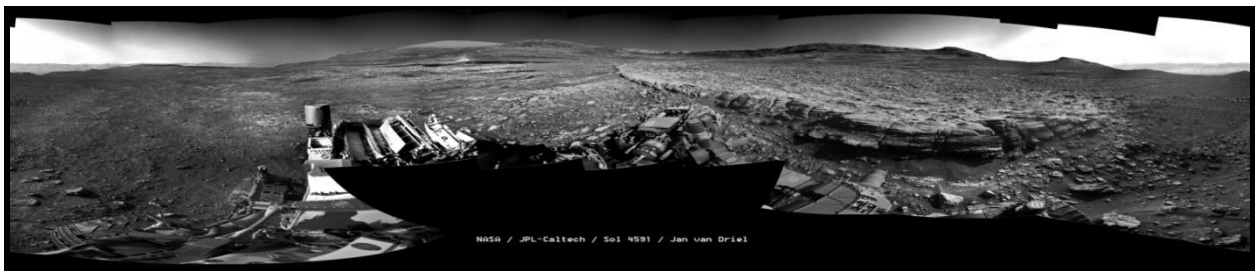


Figure 292 : Sol 4591, Volcán Peña Blanca (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 293 : Sol 4600, après un parcours de 158 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

pulvérulente aux instruments CheMin (chimie et minéralogie) et SAM (analyse d'échantillons sur Mars), et fini d'examiner les résidus de la zone de forage. L'astromobile reprend la route vers le sud-ouest au Sol 4571 (Figure 290) pour s'enfoncer plus profondément dans la zone « Bosworks » en roulant en direction de la butte « Boxwork Hill ». L'astromobile parcourt ensuite une distance de 155,74 mètres exécuté en trois séances de conduite, puis s'arrête devant un nouveau site de travail dénommée « Laguna del Bayo » entre les Sols 4575 et 4578 (Figure 289). Le rover stationné dans une dépression traversant une région fortement fracturée, va étudier le terrain ainsi que deux cibles dont la surface a été nettoyée et sous lequel se cachaient des réseaux de veines blanches transversales, soit « Tarija » (Sols 4575-77) et « Copacabana » (Sols 4577-78). L'astromobile reprend la route vers le sud-ouest au Sol 4578, et parcourt une distance de 272,8 mètres effectuée en dix séances de conduite jusqu'au Sol 4598 (Figure 291 et 292). Durant le

Planche 21 : Sol 4640 rebord nord-ouest du cratère Gale à 35 km (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

trajet le rebot a pris le temps d'étudier et de brosser plusieurs cibles sur le sol martien (« Hornitos » Sols 4580-82, « Guapay » Sols 4588-90 et « Huellas de Dinosaurios » Sols 4591), ainsi que la crête « Volcán Peña Blanca » d'environ 90 cm de haut entre les Sols 4589-92 (Figure 292). L'astromobile arrive finalement dans la partie nord de la zone de terrain fracturé « Bosworks » au Sol 4600 le 15 juillet 2025 (Figure 293). La zone est composée d'une structure en relief de plus grand en forme de caissons composées de basses crêtes résistantes d'environ 1 à 2 mètres de haut, entrecoupées de dépressions sableuses peut profonde en forme de toile d'araignée. Curiosity franchir avec succès la rampe d'axais sablonneuse de 11 mètres jusqu'au sommet, et entame le début de la phase d'exploration des crêtes encaissées de « Bosworks », une zone de travail riche en roche nodulaire, en se dirigeant vers la crête « Meson » au Sol 4602. Les instruments ChemCam et Mastcam prennent des mosaïques des crêtes plus éloignées afin d'obtenir une vue d'ensemble de leurs caractéristiques.

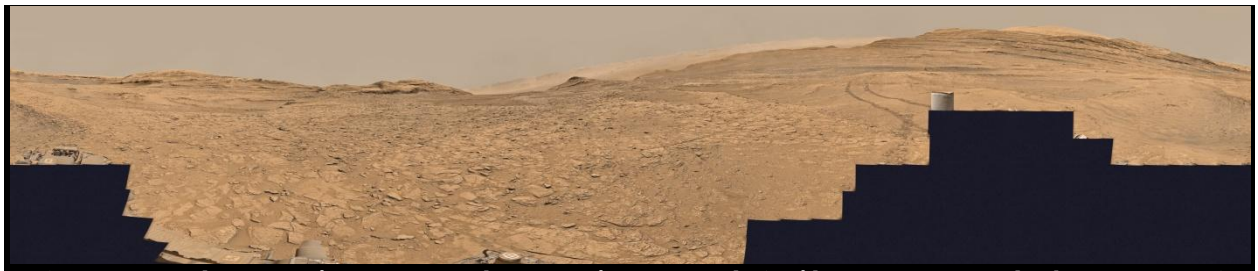


Figure 294 : Sol 4612, après un parcours de 55,38 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Figure 295 : Sol 4623 devant les dépressions Laguna Santa Rosa et Ayopaya après un parcours de plus de 84,79 mètres effectué en 5 séances de déplacement. Dans la partie gauche de l'image nous avons la butte Boxwork Hill, et dans la partie droite nous retrouvons les buttes Mishe Mokwa et Texoli qui cache en arrière plan le Mont Sharp (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Toujours en explorant les zones de crêtes et de creux de « Bosworks » en se déplaçant vers le sud en longeant la crête « Autobahn » (Figure 294-295), le rover fête sa treizième année à la surface de Mars au Sol 4621 le 6 août 2025. Sur le Sol 4625, une vidéo de nuages fait en parallèle avec une prise de vue aérienne par la caméra CaSSIS à bord de la sonde orbitale ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO), une collaboration entre l'Agence spatiale européenne (ESA)

Planche 21 : Suite du Sol 4640 rebord nord-ouest du cratère Gale (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Figure 296 : Bococo, mosaïque du micro imageur MAHLI (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

et l'agence spatiale russe Roscosmos, afin de repérer les mêmes nuages vus du dessus et du dessous. Un déplacement de 25 mètres a permis au rover de passer de l'intersection d'un nouveau site en forme de signe de paix « Peace Sign ». Curiosity étudie ensuite la roche « Bococo » entre les Sols 4624 et 4625 (Figure 296) située à l'intersection de plusieurs crêtes, et qui présentant à sa surface des nodules brillants de l'ordre du millimètre probablement composés de sulfate de calcium, signe de la présence passée d'eau souterraine. Et comme d'habitude lors d'arrêt dans un espace de travail, l'astromobile effectue des observations régulières de surveillance atmosphérique à l'aide des instruments REMS, RAD et DAN avant de reprendre la route vers le sud-ouest en direction de la dépression « Cerro Paranal » et de la zone de crête « Rio Frio » (Sols 4628-4636). Sur le Sol 4640 le 25 août 2025 sur la crête « Thumb » (Sols 4636-4640) à la hauteur de la dépression « Mojo » (Planche 21), et profitant de la très faible concentration de poussière dans l'atmosphère dans des conditions de ciel exceptionnellement dégagées à cette période de l'année. Le rebot photographie les remparts de la bordure nord-ouest du cratère « Gale » situé à environ 35 kilomètres. La poussière dans l'air est à son minimum pendant l'hiver martien, offrant ainsi à Curiosity une vue imprenable sur l'immense fond du cratère depuis son poste d'observation situé au pied du mont « Sharp ». Le panorama a été assemblé à partir de 44 images prises par la caméra Mastcam du rover Curiosity. Les couleurs de ces images ont été ajustées pour correspondre aux conditions d'éclairage telles que l'œil humain les percevrait sur Terre. Vers le centre de la partie droite de l'image de gauche, nous pouvons voir la vallée « Peace Vallis », un ancien lit de rivière. À l'extérieur du cratère « Gale » juste au-dessus de « Peace Vallis », se dresse une montagne située à environ 91 kilomètres. Curiosity est actuellement en pleine campagne d'observation, cherchant à comprendre l'origine des crêtes et des creux si marqués dans cette zone du mont « Sharp ». Lors de la première identification de ce terrain depuis l'orbite, l'hypothèse avancée était que les crêtes pourraient résulter d'une cimentation par des fluides en circulation, suivie d'une érosion différentielle du substratum rocheux moins résistant situé entre elles (les creux).

Figure 297 : Sol 4656, après un parcours de 226,96 mètres en 12 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Nev-T)

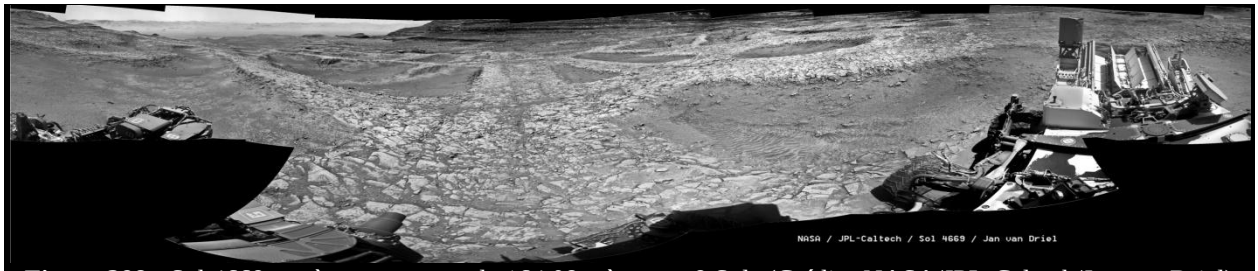


Figure 298 : Sol 4669, après un parcours de 164,08 mètres en 9 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 299 : Sol 4671 près de la dépression Laguna Socompa à gauche et de Laguna Escondida à droite, après avoir parcourus une distance de 32,81 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Entre les Sols 4660 et 4669 (Figure 298), Curiosity parcourt plus de 91,62 mètres sur un terrain très accidenté en suivant le trajet de l'une des plus grandes crêtes vers le sud-est nommée « Arare ». Il est temps pour l'astromobile de se prépare afin de choisir les prochains sites de forage et d'échantillonnage, où les instruments SAM (Analyse d'Échantillons sur Mars) et CheMin (Chimie et Minéralogie à diffraction des rayons X) pourront étudier la structure en forme de boîte de la zone de « Bosworks ». La comparaison de la minéralogie (CheMin), de la teneur en composés volatils et de la chimie organique (SAM) des crêtes et des creux nous permettra de mieux comprendre la formation de cette structure. Les analyses APXS et ChemCam, réalisées du centre des crêtes jusqu'à leurs bords et dans le creux adjacent, ont permis de rechercher des variations chimiques indiquant la nature des matériaux qui assurent la cohésion des crêtes et leur surélévation par rapport aux creux. L'imagerie RMI Mastcam et ChemCam a cartographié l'architecture des crêtes et des creux, à la recherche de structures fournissant des indices sur leur formation. L'imagerie MAHLI des cibles (crêtes et creux) a fournis des données sur les variations de granulométrie susceptibles d'indiquer le mode de dépôt du substratum rocheux. À chaque arrêt, l'instrument DAN a analysé le sol sous les pieds du rover, mesurant la teneur en hydrogène (et par extrapolation en eau) afin d'observer les variations entre les crêtes et les creux. Et l'instrument RAD a désormais mesuré le rayonnement de surface pendant plus d'un cycle solaire complet ; des données qui seront essentielles pour les futures explorations humaines de Mars. Au Sol 4671 (Figure 299), le rebot se déplace vers le sud à travers la dépression « Laguna Socompa » pour effectuer une exploration plus approfondie du terrain à la recherche d'un nouveau site de forage. Durant le trajet vers le sud, le rover franchit le cap du 36ème kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars au Sol 4673 le 28 septembre 2025, et une semaine plus tard en faisant route de nouveau vers le nord, Curiosity entame sa septième année martiennes (une année martienne équivaux à 687 jours terrestres) à explorer la surface de Mars au Sol 4681 le 6 octobre 2025, peu après 1h UTC.

La première campagne de forage effectuée dans la zone de « Bosworks » (Planche 22) a lieu entre les Sols 4687 (Figure 300) et 4709 sur la roche « Valle de la Luna », située dans le

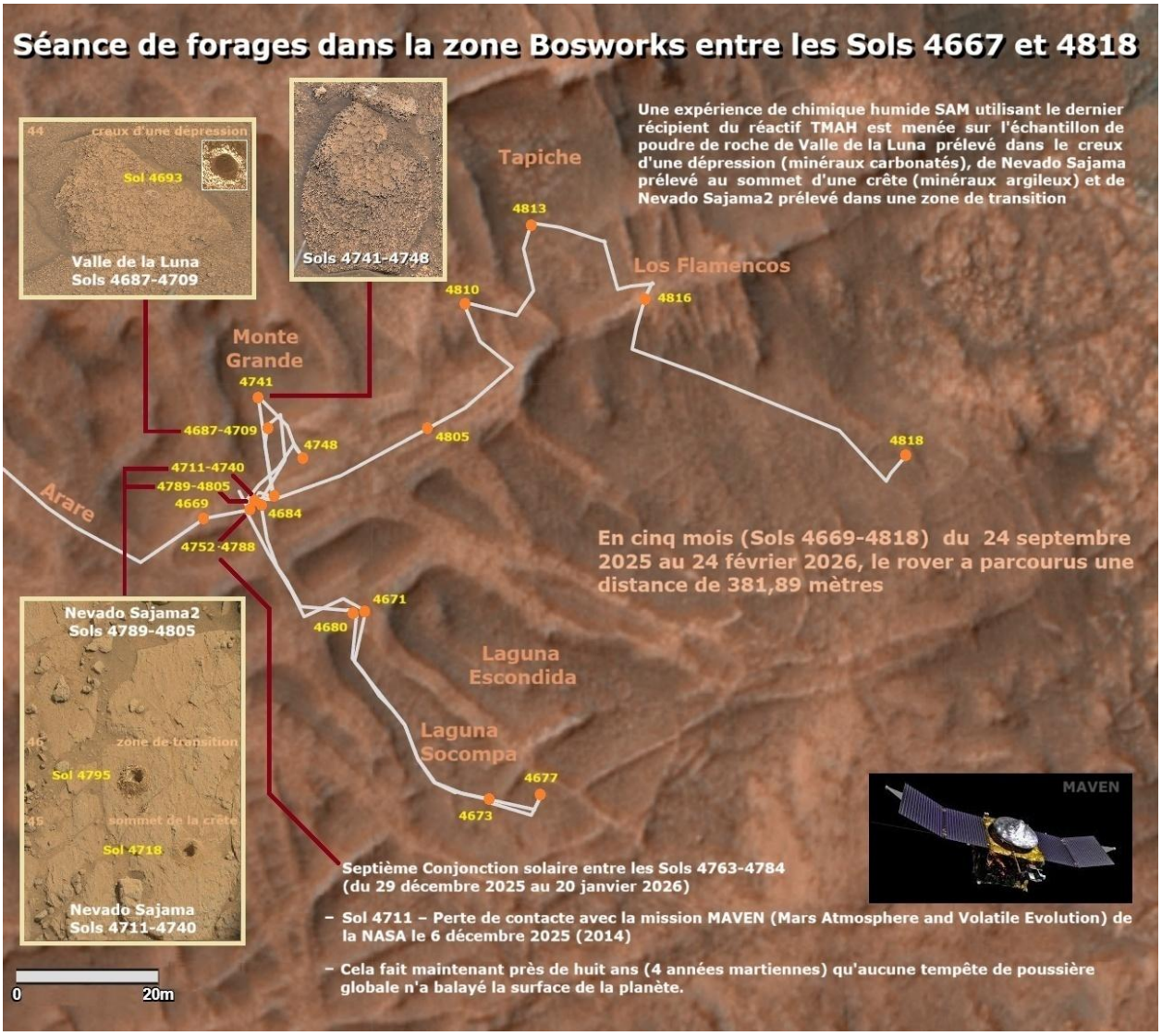


Planche 22 : Campagne de forage effectuée dans la zone principale de Bosworks entre les Sols 4669 et 4818

substratum rocheux de la cavité de la dépression « Monte Grande » (Sols 4687-4711). La campagne inclus un test de "précharge" (foret en appui en appliquant une pression sur la surface du substratum rocheux) au Sol 4690 (Sols 4690-93), afin de caractériser le comportement potentiel du bras du rover et de la roche pendant le forage dans le but de vérifier que la roche n'est pas trop friable, car une fracture de la roche peut bloquer le foret, suivit d'une séance de brossage pour éliminer les poussières qui pourraient fausser l'analyse chimique et minéralogique. Le 44eme forage est exécuté durant la nuit du Sol 4693 vers 01h30 le 19 octobre 2025 (Figure 303:A et Planche 22). Une portion de l'échantillon après tamisage est ensuite donnée à SAM au Sol 4699 et 4704, pour effectuée des analyses des gaz dégagés (EGA) sur plusieurs Sols par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS), qui nous permettra de caractériser toute matière organique (contenant du carbone) présente dans l'échantillon. Une opération très énergivore qui réduit le temps disponible pour d'autres investigations. Et CheMin reçois une portion de l'échantillon au Sol 4706.

Figure 300 : Sol 4687, après un parcours de 128,26 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Nev-T)

Figure 301 : Sol 4741, après un parcours de 30,17 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 302 : Sol 4752, après un parcours de 29,45 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Le robot se déplace ensuite sur une courte distance de 13,2 mètres vers le sud-ouest entre les Sols 4709 et 4711, pour rejoindre l'emplacement du 45ème forage de la mission situé sur l'une des crêtes surélevées adjacente, afin de comparer les résultats obtenus dans la dépression de « Monte Grande » avec ceux de cette zone de crête. La deuxième campagne de forage inclus une séance de brossage au Sol 4711 sur une zone présentant un réseau de fines veines de teinte blanchâtre, suivit du forage dénommé « Nevado Sajama » (Sols 4711-4740) prélevé au sommet de la crête au Sol 4718 le 13 novembre 2025 (Figure 303:B). Une portion de l'échantillon après tamisage de « Nevado Sajama » est donnée à CheMin au Sol 4720. Et SAM reçois une portion de l'échantillon au Sol 4725 et 4736, pour effectuée des analyses s'échelonnant sur plusieurs Sols. Entre temps sur le Sol 4740, l'équipe de la mission MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) en partenariat avec le réseau de communication avec l'espace lointain de l'agence, poursuit les activités de récupération après avoir perdu le contact avec le vaisseau spatial le 6 décembre 2025 (en orbite depuis 2014). Après plus d'une décennie de service et après avoir fait plusieurs tentatives de récupération avec la sonde, la NASA a officiellement déclaré la fin de la mission en juin 2026. Quatre orbiteurs martiens, dont MAVEN, assuraient les communications entre la surface et les rovers. Les sondes Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), Mars Odyssey et ExoMars Trace Gas Orbiter (EXTO) restent opérationnelles.

L'astromobile se déplace ensuite vers le nord à travers la dépression « Monte Grande » au Sol 4741 (Figure 301), avant de revenir sur ses pas sur les Sols suivant dans le but de rejoindre

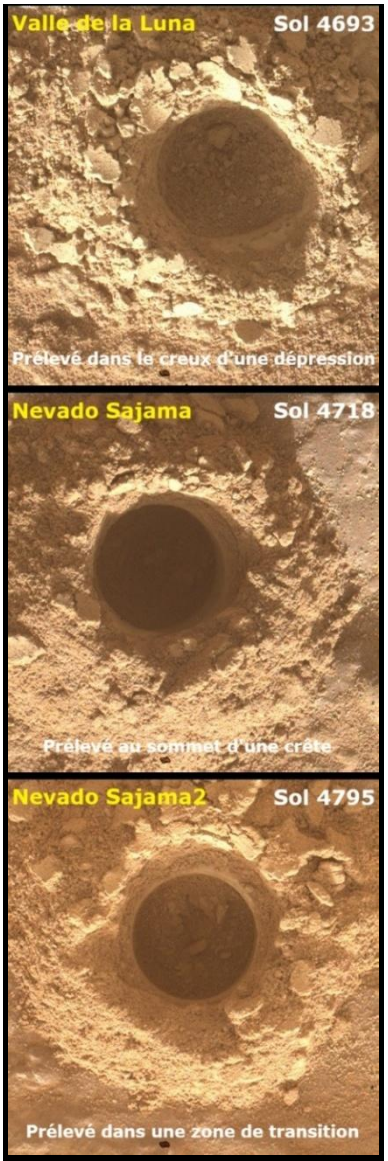


Figure 303 : Forages à Bosworks entre les Sols 4669 et 4818 (NASA/JPL-Caltech/MSSS)

une zone se trouvant sur la crête sud de la dépression « Monte Grande » au Sol 4752 (Figure 302). L'objectif est de préparer le rover à passer à travers la septième conjonction solaire entre les Sols 4763-4784 du 29 décembre 2025 au 20 janvier 2026. Cette conjonction de Mars et de la Terre, qui se produit tous les 26 mois en raison de leurs orbites différentes ou la Terre et Mars sont masquées l'une par l'autre par le Soleil, coïncide avec la période des fêtes. Cinq jours après la sortie de la conjonction solaire, Curiosity se déplace de 2 mètres vers le nord-est au Sol 4789 pour rejoindre le site du 46ème forage qui se trouve juste au-dessus à quelques centimètres de « Nevado Sajama ». Les résultats de la première visite sur le site de forage « Nevado Sajama » se sont révélés suffisamment prometteurs pour justifier un retour afin d'étudier plus en détail les minéraux et les composés contenus dans cette roche. Cette analyse approfondie sera effectuée par voie humide ce qui implique l'utilisation du second et dernier flacon contenant le réactif chimique TMAH, qui permet de rendre détectables par SAM des molécules qui seraient autrement indétectables. Le premier flacon a été utilisé il y a près de six ans déjà lors de la campagne d'échantillonnage effectuée à « Mary Anning 3 ». Le réactif TMAH est un produit chimique que nous pouvons mélanger à l'échantillon de poudre de roche de « Valle de la Luna » prélevé dans le creux d'une dépression, de « Nevado Sajama » prélevé au sommet d'une crête et de « Nevado Sajama2 » qui sera prélevé dans une zone de transition. Dans une séquence standard sans dérivatisation (MTBSTFA) ni thermochimiolyse (TMAH), une coupelle en quartz vide est préconditionnée sous flux d'hélium dans le four de pyrolyse à environ 900 °C, puis refroidie à température ambiante avant l'introduction des portions d'échantillon dans la coupelle nettoyée. S'ensuit un chauffage par pyrolyse pour les analyses EGA et GC-MS. Les gaz libérés dans une plage de températures prédéfinie du four, appelée coupes de température, sont envoyés au piège SAM HC pour une analyse GC-MS ultérieure. Sans dérivatisation ni thermochimiolyse, une séquence EGA/GC-MS nécessite deux ou trois cycles, tandis que la thermochimiolyse et la dérivatisation sont généralement réalisées en un seul cycle sur le même Sol.

L'expérience TMAH consomme une grande partie de l'énergie de Curiosity, ce qui laisse peu de ressources pour d'autres activités scientifiques. Cette expérience rare de chimie par voie humide de SAM sert à identifier d'éventuelles molécules organiques, molécules à base de carbone essentielles à l'apparition de la vie. Collectés par forage et analysés par rayons X (CheMin) et par cuisson à haute température (SAM-EGA pyrolyse), les analyses ont révélé la présence de minéraux argileux dans la crête à « Nevado Sajama » et de minéraux carbonatés à « Valle de la Luna » dans la dépression « Monte Grande », apportant ainsi de nouveaux éléments de compréhension sur la formation de ces structures (Figure 304). La troisième campagne de forage (Sols 4791-4805) effectuée dans la zone de « Bosworks », inclus une séance de brossage de la cible au Sol 4791, suivit du forage dénommé « Nevado Sajama2 » (Sols 4795-4805) prélevé dans

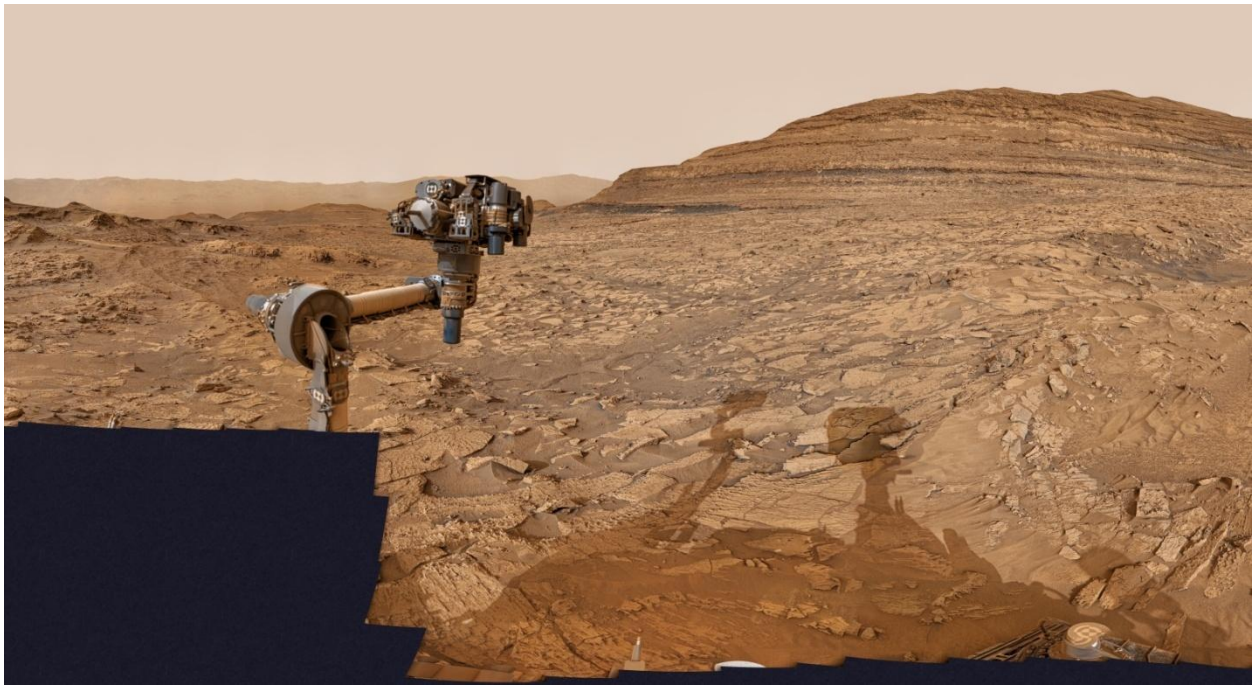


Planche 23 : Sol 4812 à l'ouest de la dépression Tapiche (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

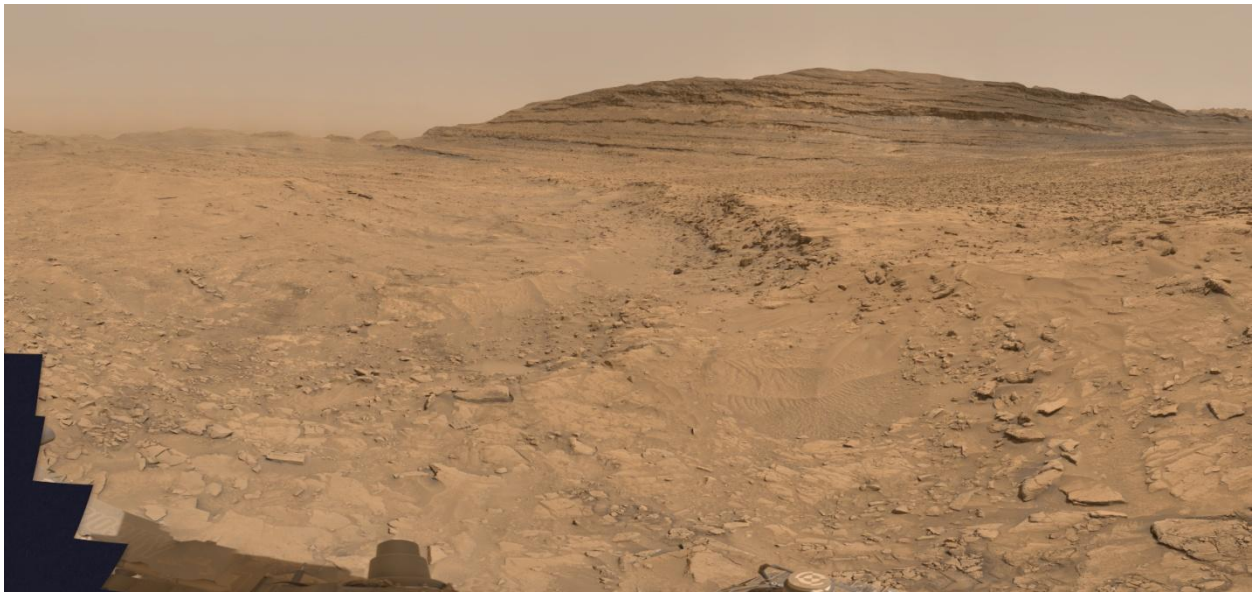


Planche 24 : Sol 4848 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Figure 304 : Sol 4805, après un parcours de 29,26 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Planche 23 : Suite du Sol 4812 à l'ouest de la dépression Tapiche (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

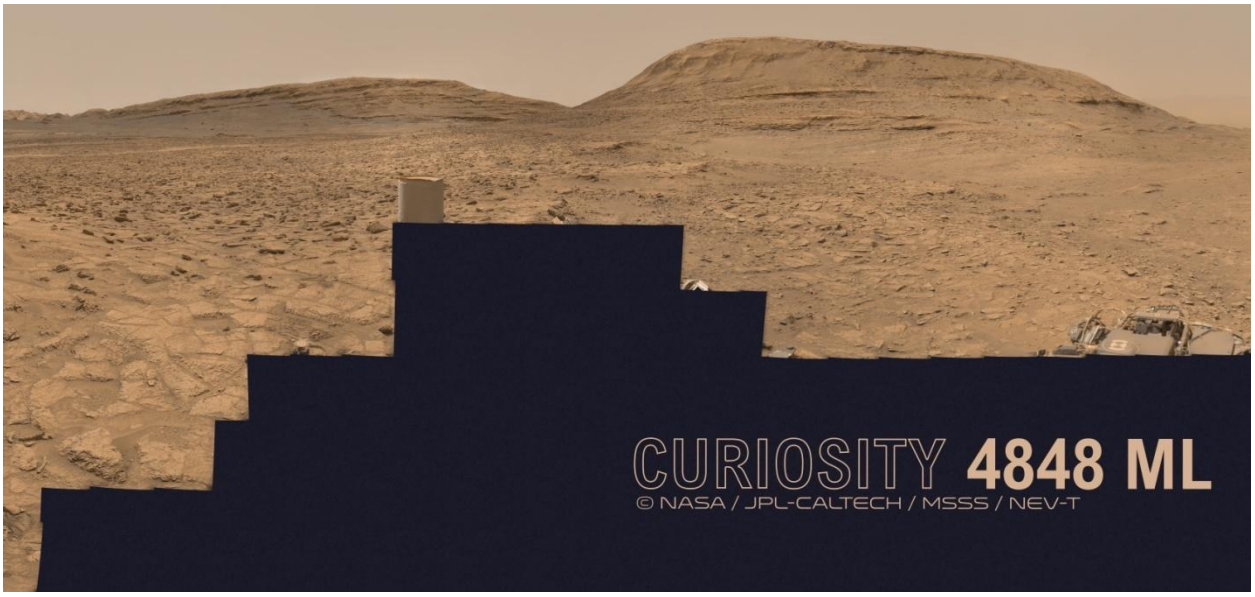


Planche 24 : Suite du Sol 4848 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Figure 305 : Sol 4820, après un parcours de 137,49 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 306 : Sol 4823, après un parcours de 7,16 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 307 : Sol 4830, après un parcours de 67,72 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 308 : Sol 4848, après un parcours de 225,39 mètres en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

une zone de transition au Sol 4795 le 31 janvier 2026 à 22h55 UTC (Figure 303:C). Une portion de l'échantillon après tamisage est donnée à SAM au Sol 4798 le 4 février 2026. Il s'agit de la dernière portion que reçois l'instrument SAM avant d'effectuée une expérience de chimie humide sur les échantillons provenant des trois dernier forages.

La phase finale de l'exploration de la formation principale en forme de boîte effectué à « Bosworks », qui consiste à explorer les limites Est et sud du terrain, s'effectue à travers la dépression « Tapiche » et de la crête « Los Flamencos » entre les Sols 4813 et 4818. L'astromobile Curiosity reprend la route vers le sud au Sol 4823, et parcours une distance de plus de 300 mètres effectuée en 9 séances de roulement quotidien jusqu'au Sol 4848 (Planche 23, Figure 304 à 308). La zone de terrain marquant la limite entre la structure en forme de boîte etl'unité de sulfate adjacente est situé près de l'extrémité sud de la butte « Boxwork Hill ». Curiosity quitte « Bosworks » dans le but de poursuivre l'ascension des pentes du mont « Sharp » et de l'exploration de l'unité de sulfate au Sol 4848 le 27 mars 2026 (Figure 308). Cela fait maintenant près de huit ans (quatre années martiennes) qu'aucune tempête de poussière globale n'a balayé la surface de la planète rouge.

En Route Vers Les Yardangs
(Sol 4849 à -----)

EN PRÉPARATION----- (à ne pas lire, car il s'agit d'une suite de note et de remarque)

L'aventure de Curiosity se poursuit sur le Sol 4849 (28 mars 2026) sur un terrain accidenté qui regroupe un ensemble d'affleurements qui présente une texture alvéolée à leur surface (Figure 1 et 2). Le substratum rocheux qui caractérise le terrain est composé de nombreuses crêtes résistantes qui forment un motif polygonal qui sillonnent leur surface en forme de nid d'abeille. Ces structures polygonales représentent à l'origine des "fentes de dessiccation", similaires à celles observé sur une étendue d'eau boueuse asséchée. Cela résulte le plus souvent d'un processus en trois étapes après que les fissures se soient formées suite à un long séchage : au fil du temps des sédiments soufflés par le vent s'accumulent dans les fissures ouvertes. Plus tard, ces sédiments et la boue séchée deviennent de la roche sous la pression de plusieurs couches plus jeunes qui s'accumulent au-dessus d'eux. Après que les couches supérieures aient été lentement érodées par le vent, le matériau de remplissage des fissures résiste mieux à l'érosion que le matériau autrefois boueux, de sorte que le motif qui a commencé sous forme de fissures apparaît comme des crêtes. Curiosity s'approche du petit cratère « Antofagasta » d'environ 10 mètres de diamètre au Sol 4865 le 13 avril 2026 (Figure 2), un cratère relativement jeune de moins de 50 millions d'années. Les cratères agissent comme des « forets naturels », exposant à la surface des matériaux anciens qui seraient restés enfouis. Il est donc possible que des matériaux à l'intérieur et autour du cratère n'aient été exposés aux radiations intenses, destructrices de molécules organiques, que très récemment. Curiosity a déjà découvert de nombreuses molécules organiques résistantes ayant survécu à des milliards d'années, « Antofagasta » pourrait nous aider à répondre à cette question mais seulement si le

Figure 1 A : Sol 4854

Figure 1 B : Sol 4861
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Figure 2 : Sol 4865, cratère Antofagasta et affleurements alvéolées aux motifs polygonal en forme de nid d'abeille
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Jan van Driel)

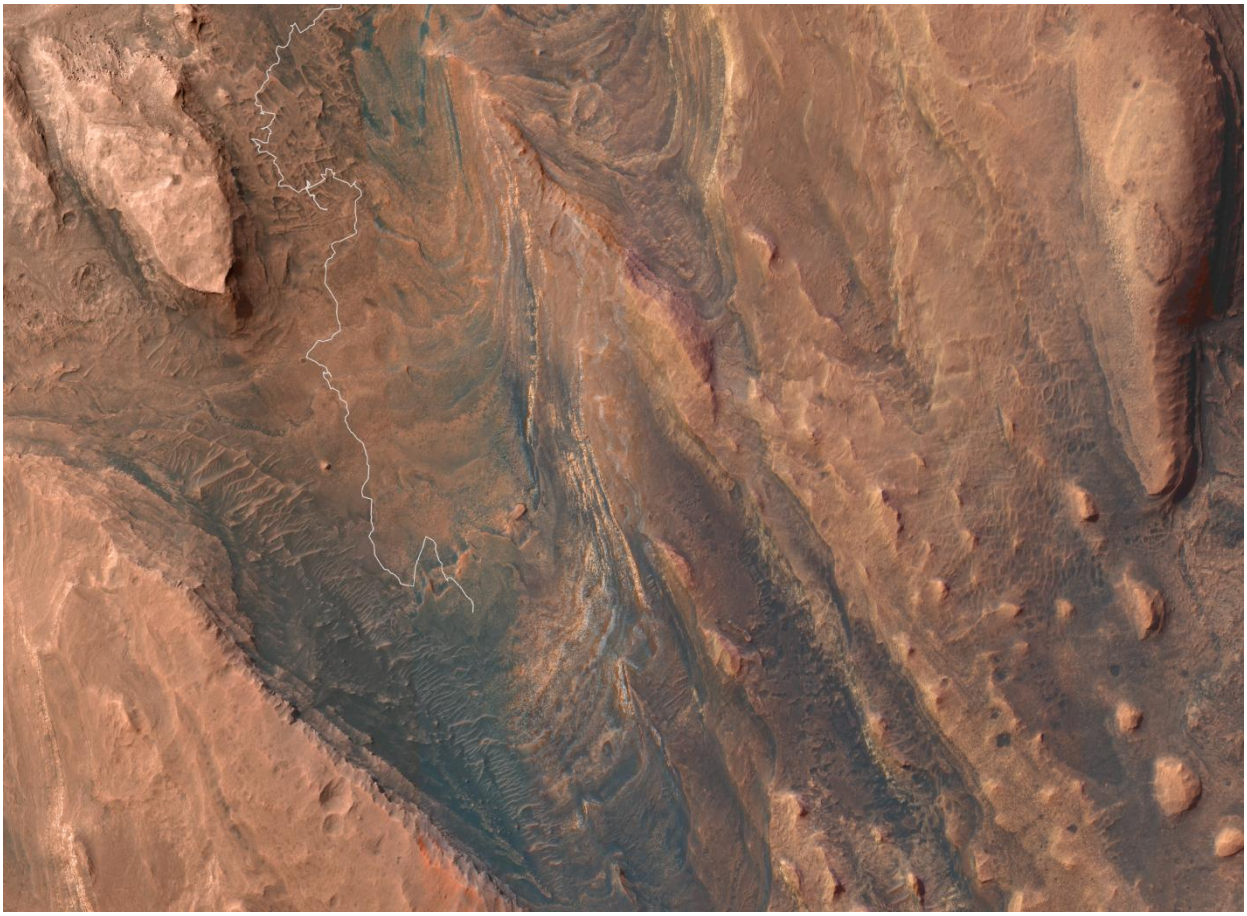


Planche 1 : Trajet de Curiosity entre les Sols 4849 et --- entre le 28 mars 2026 et le ----. Image de haute résolution obtenu le 5 août 2021 par la caméra HiRISE (High-Resolution Imaging Science Experiment) d'une résolution inférieure au mètre, et par la caméra Context (CTX, 6 mètres par pixel) de Mars Reconnaissance Orbiter (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

cratère est suffisamment grand pour avoir excavé des roches profondes, avec un rebord bien défini et peu érodé. Le fond du cratère s'est avéré rempli d'un matériau sableux ondulé sombre qui recouvrait les couches rocheuses les plus intéressantes. Les atteindre depuis le bord aurait placé le rover dans un angle tellement délicat pour livrer l'échantillon aux instruments que le projet de forage a été abandonné.

Figure 3 : Sol 4871, après avoir parcourus 55 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Le rover reprend la route vers le sud en direction de son nouvel objectif à long terme, il s'agit du complexe montagneux appelé « Yardangs ». Le terme « Yardangs » vient de la langue ouïghoure qui signifie "rive escarpée" ou "mur escarpé" de composition anhydre. Ces crêtes se

forment grâce à un processus d'érosion éolienne dans lequel des vents forts sculptent et érodent les matériaux les plus mous tout en laissant intactes les roches les plus dures. Au fil du temps, cette érosion sélective entraîne la formation de crêtes allongées caractéristiques observées sur la surface martienne. Curiosity parcourt 55 mètres vers le sud-est le 17 avril 2026 au Sol 4868 (Figure 3), délaissant le petit cratère « Antofagasta » pour se diriger vers un petit monticule qui se trouve à environ 200 mètres au sud de la position du rover. L'objectif est de pouvoir comparer la minéralogie de l'unité de sulfate stratifiée à celle du dernier forage se trouvant dans la même unité géologique, effectué dix mois plutôt (Sol 4107 le 24 février 2024) avant le passage dans la zone de « Bosworks » sur le site de « Mineral King » situé à près de 160 mètres en dessous de l'emplacement actuel.

La roche cible pour y effectuer un nouveau forage dans une section post-boxworks constituée de sulfate stratifié était initialement nommée « Atacama », que l'on peut voir vers le centre de la partie inférieure de la figure 3, mais les tests de préforage (Sol 4874) ont amené l'équipe du rover à changer de roche pour finalement cibler une roche voisine d'un diamètre estimé à 45 cm à sa base et de 15 cm d'épaisseur (Sols 4877-89). L'astromobile assiste à l'arrivé de son huitième solstice d'été dans l'hémisphère Sud de la planète Mars au Sol 4876 le 25 avril 2026. La campagne de forage débute le lendemain au Sol 4877 le 26 avril 2026 à 03:12:48 (UTC), mais vers la fin du forage (Sol 4877) au moment de rétracté le bras pour libérer le trou fraichement creusé, la roche s'est soulevée du sol d'environ 2 à 3 cm le foret coincé à l'intérieur, suspendue par le manchon fixe entourant le foret rotatif (Figure 4). Un foret coincé dans la roche aurait posé un énorme problème pour la suite de la mission de l'astromobile sur Mars. Si le rover n'arrive pas à dégager le foret de la roche, il sera alors nécessaire de l'abandonner pour libérer le bras, et d'utiliser l'un des deux kits de forage de rechange installé devant le rover. Après plusieurs tentatives de décrochage, en jouant sur les différents niveaux de vibration et de rotation du foret, une nouvelle méthode est adopter au Sol 4881 qui consiste a soulevé la roche très haut, et d'exécuter avec bras robotique des manœuvres de balancement de la tourelle de droite à gauche tout en faisant vibrer à nouveau la foreuse, mais la roche très tenace reste toujours accrochée au foret (Figure 5). Finalement le 2 mai au Sol 4883 (Figure 6), l'équipe de Curiosity a retenté l'expérience en inclinant davantage la tourelle en la faisant basculée alternativement à 90° et à l'horizontale, toute en la faisant vibrer et tourner le trépan. L'équipe prévoyait de répéter ces actions à plusieurs reprises, mais la roche

Figure 4 : Atacama (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Figure 5 : Manœuvre de la tourelle pour tenter de décrocher la roche (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Figure 6 : Manœuvre de la tourelle pour décrocher la roche Atacama (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

« Atacama » s'est détachée dès la première tentative, se fracturant à l'impact avec le sol. Dans le cadre du plan Sol 4883-4885, l'équipe a pu tirer parti des efforts déployés pour retirer le bloc d'« Atacama » en effectuant des observations LIBS par ChemCam du matériau granulaire situé sous l'emplacement du bloc. Cela comprenait la cible « Cuturipa », située sous l'emplacement du bloc, et un profil de la paroi de la cavité où se trouvait le bloc qui a reçu le nom de « Chaitén » (Figure 7). ChemCam a ciblé l'une des faces de fracture nettes avec deux balayages LIBS aux emplacements « Tamarugal » et « Tamarugo », puis a effectué un autre balayage sur une zone de roche-mère claire, autrefois sous Atacama, à l'emplacement « Colchane ». Le rover reprend la route vers le sud au Sol 4889.

Figure 7 : (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Nev-T)

Sur le nouvel emplacement « Campo Marte » atteint le 12 Mai 2026 (Sol 4893). Ce nom peut se traduire littéralement de l'espagnol par « Champ de Mars ». La nouvelle cible de forage représente la même strate géologique qu'Atacama, à savoir l'unité de sulfate stratifiée située au-dessus des structures en forme de boîte. Nous avons également photographié le bloc de Campo Marte sous plusieurs angles et constaté qu'il est nettement plus épais que le bloc d'Atacama. Nous espérons donc que sa masse plus importante le maintiendra au sol après le forage, ce qui nous permettra cette fois de retirer le trépan normalement. Curiosity a commencé ses investigations sur le bloc rocheux stratifié face à lui avec une série d'opérations de "pré-forage" pour en déterminer la pertinence sur les plans techniques, chimiques et minéralogiques. Dans ce but, ce sont les outils situés sur la tourelle en bout du bras robotique qui sont sollicités. Il s'agit d'abord du brossage avec la brosse DRT (Dust Removal Tool) d'un diamètre efficace de 4,5 cm. Elle permet d'enlever la couche superficielle de poussière qui recouvre la zone à examiner. Puis de l'application du spectro APXS sur la partie brossée (pour analyse de la chimie élémentaire du bloc), et enfin de la mise en pression du foret sur la zone de forage (test de pré-charge) pour vérifier la stabilité et la solidité du bloc rocheux. Ce dernier point est ici particulièrement sensible, compte tenu des derniers évènements.

Figure 10 : Sol 4897
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Séance de brossage au Sol 4895 (Sol 4893-77). Suivit d'une campagne de forage effectuée à « Campo Marte » (Sols 4897-4912) au Sol 4897 le 16 mai 2026 47^{iem} (Figure 10). Sol 4904 Sam. Au 3 Juin 2026 (Sol 4914) Curiosity s'est à nouveau mis en mouvement vers le Sud et a parcouru 35,83 mètres tout en s'élevant encore de 2,48 mètres. Depuis son site d'atterrissage le rover a parcouru 36,98 kilomètres et s'est élevé en hauteur sur plus de 937,34 mètres.

Lors du survol de Mars par la sonde Psyché le 15 mai 2026 (Sol 4898), plusieurs missions martiennes de la NASA et de l'ESA ont coordonné leurs efforts pour capturer des images et des données atmosphériques complémentaires. La sonde spatiale Psyché de la NASA se déplaçant actuellement à près de 20 000 kilomètres par heure, l'un des plus grands membres d'une catégorie spectrale inhabituelle d'astéroïdes encore jamais visitée par un engin spatial, la sonde utilise la gravité de Mars pour obtenir une accélération supplémentaire. Lancée à l'automne 2023 la mission devrait atteindre en 2029 l'objet 16 Psyché d'un diamètre de 280 kilomètres, situé dans la ceinture principale d'astéroïdes entre Mars et Jupiter. La sonde a survolé la surface martienne à une distance d'environ 4 500 kilomètres. Cette manœuvre permet à l'appareil d'augmenter sa vitesse et de corriger sa trajectoire vers sa destination principale, l'astéroïde métallique 16 Psyché. Pour les experts de la NASA, ce survol est d'une grande importance non seulement pour la navigation, mais aussi sur le plan scientifique. La caméra multispectrale de l'appareil prendra des milliers de photos de Mars, ce qui constitue la première occasion de tester l'instrument à proximité de grands objets plutôt que dans l'espace lointain, ce survol a néanmoins constitué une précieuse opportunité pour tester les instruments et les chaînes d'analyse de données de la sonde, et valider leur étalonnage. C'est pourquoi l'équipe de Curiosity a planifié une série supplémentaire d'observations atmosphériques synchronisées avec le survol de Psyché : une vidéo zénithale avec NavCam pour documenter les nuages et une observation solaire avec la Mastcam pour mesurer l'opacité atmosphérique. Le rover Curiosity, aux côtés de son homologue Perseverance et d'orbiteurs comme le Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) et Mars Express, a fourni des observations de la surface et de l'atmosphère martienne. Ces données synchronisées permettent aux scientifiques de calibrer et de caractériser les caméras multispectrales de Psyché en comparant ses images avec celles de missions déjà bien établies autour et sur la Planète Rouge.

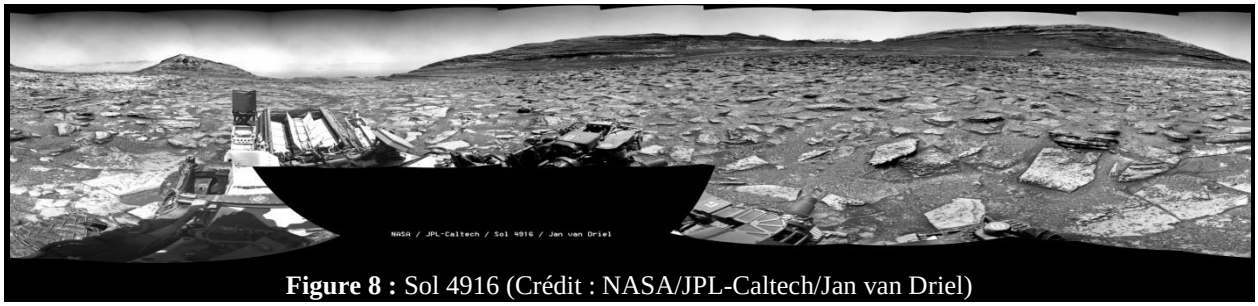


Figure 8 : Sol 4916 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Sol 4904, analyse de SAM sur plusieurs jours
Sol 4908, analyse de CheMin sur plusieurs jours

Figure 9 : Sol 4923 - Mira Flores d'environ environ 6 mètres de haut (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Fredk)

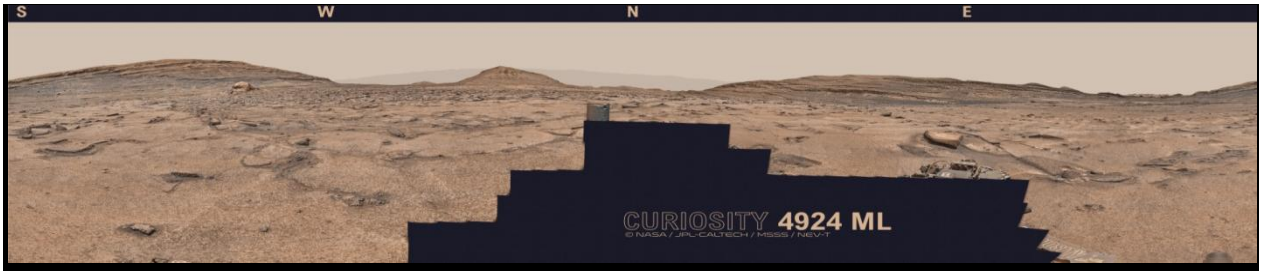


Figure 8 : Sol 4924 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Figure 8 : Sol 4928 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

- Sol 4916, 37 kilomètre 05-06-2026
Depuis que Curiosity a laissé les boxworks derrière lui, le terrain est uniformément recouvert d'un chaos de blocs de roches finement stratifiées (Figure 11), avec une continuité rencontrée très rarement sur l'ensemble du trajet du rover.

- Sols 4912-4928, en 7 séances de roulement quotidien 194,43 mètres et prend le panorama de la Figure 8. On peut voir sur la figure 8 (Sol 4924) en partant de la gauche vers la droite : la colline « Kimsa Chata » "Cordillera" avec en avant plan la petite butte « Mira flores » qui se trouve du côté Est du rover, suivit au loin par les collines « West Butte » et de « Paniri Butte ». Au centre de l'image en regardant en direction plein nord, nous retrouvons la zone de travail des « Bosworks » ou les remparts du cratère sont occultés par la poussière atmosphérique, et à droite nous avons la colline « Mishe Mokwa » (qui cache la fin de la grande colline « Texoli ») suivit au loin, dans la partie droite de l'image, par les « Yardangs » qui se trouve vers l'extrémité sud de la colline « Kimsa Chata » "Cordillera" à environ 2 km.

- formations polygonales En forme de nid d'abeille
(Sol 4928) Curiosity Rappel au sujet de ces formations évaporitiques polygonales:

William Rapin de l'Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie de France affirme que la formation de fissures de boue est une indication claire du changement saisonnier où des conditions humides et sèches se produisent à plusieurs reprises. "C'est la première preuve tangible que nous avons vue que l'ancien climat de Mars avait des cycles humides-secs aussi réguliers".

Nous observons des crêtes polygonales centimétriques exhumées, enrichies en sulfate et reliées par des jonctions en Y, qui témoignent de fissures formées dans la boue fraîche à la suite de cycles humides-secs répétés et d'intensité régulière.

Au lieu d'une activité hydrologique sporadique induite par des impacts ou des volcans, nos résultats indiquent l'existence d'un climat cyclique soutenu, voire saisonnier, sur la planète Mars primitive. Cela indique que la transition Noachien-Hespérien (il y a 3,8 à 3,6 milliards d'années) a pu maintenir un régime climatique semblable à celui de la Terre et des environnements de surface favorables à l'évolution prébiotique. Compte tenu de la répétition apparente et de la faible profondeur de dessiccation (quelques centimètres), les cycles humides et secs pourraient avoir été saisonniers, mais pourraient également s'être produits à des échelles de temps plus courtes.

(Fin du résumé pour le Sol 4928)

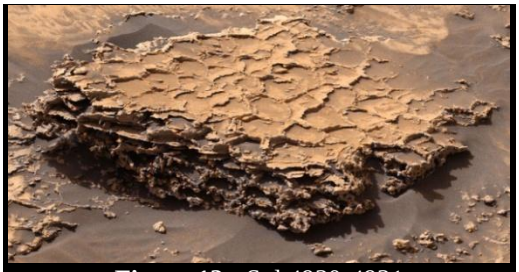


Figure 12 : Sol 4930-4931
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Alors que le rover Curiosity de la NASA a récemment entamé son ascension d'une vallée martienne surnommée « Valle Grande » Planche 2, des textures alvéolées appelées fractures polygonales, mesurant chacune entre 4 et 8 centimètres de diamètre. La mission avait déjà repéré à plusieurs reprises de petites zones de ces formes géométriques, mais jamais à l'échelle de celles découvertes dans Valle Grande. , les formes polygonales s'étendent à perte de vue. Elles épousent même les flancs d'une butte voisine surnommée « Miraflores », haute de 6 mètres et coiffée d'une épaisse couche de sable.

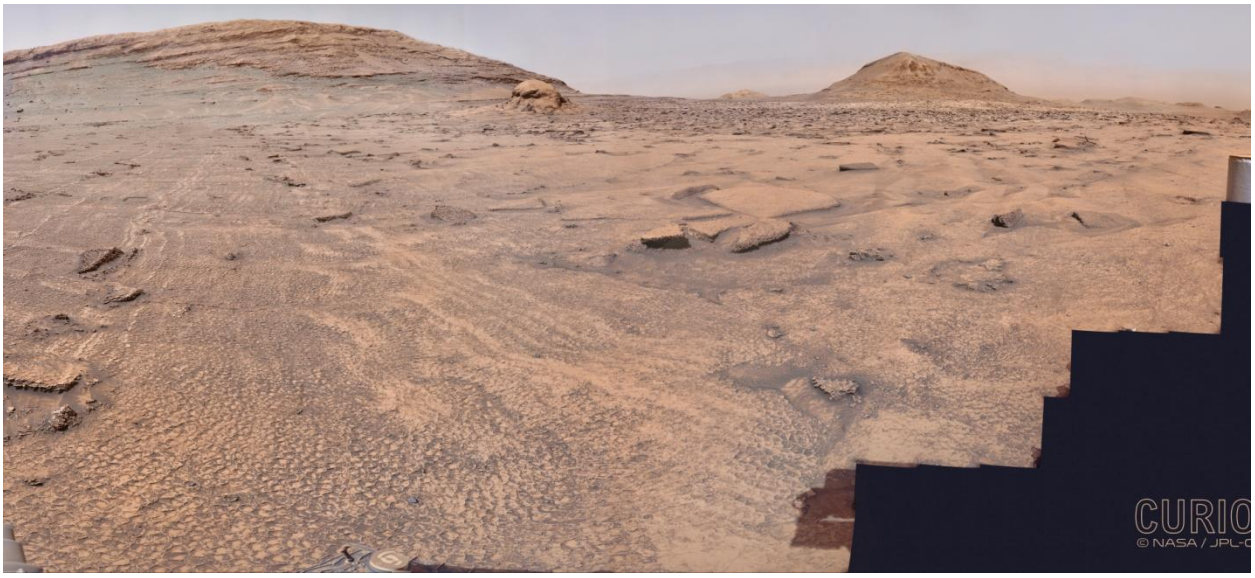


Planche 2 : Sol 4930-4931 Valle Grande (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Figure 11 : Sol 4939 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 11 : Sol 4946 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 14 : Sol 4942 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Kevin M. Gill)

Figure 15 : Sol 4947 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Fredk)

Sol 4956 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

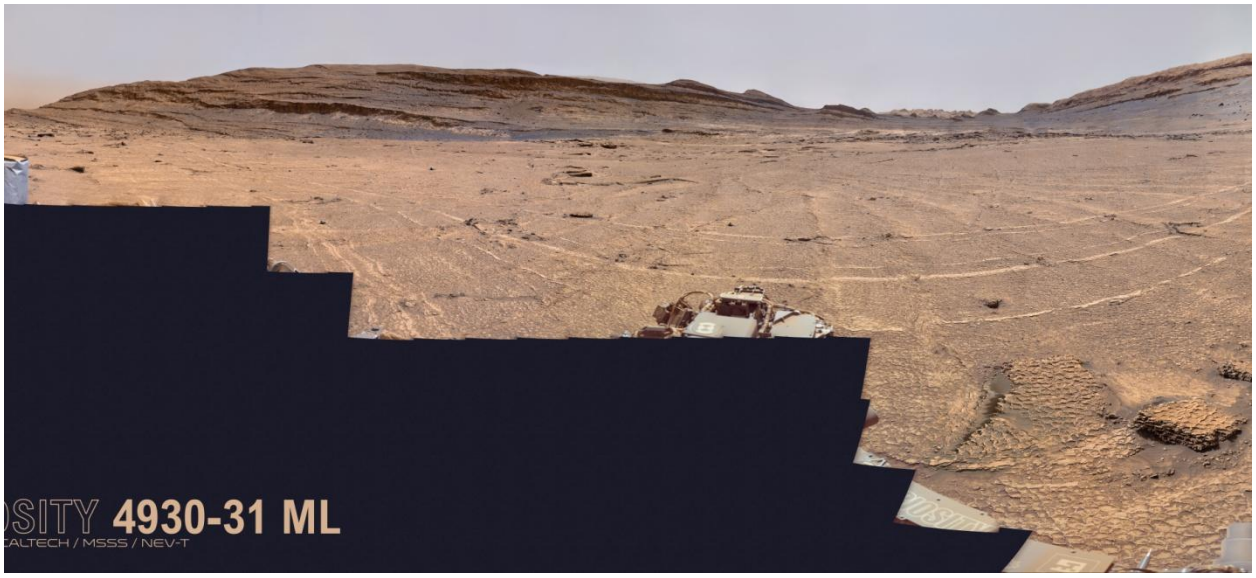


Planche 2 : Suite du Sol 4930-4931 Valle Grande (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Figure 11 : Sol 4959 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Sol 4944. Le 7 juillet 2026 au Sol 4947, le rover Curiosity rencontre sur sa route une petite météorite que l'on peut voir en bas à droite de la figure 12 positionnée au centre droit d'un pavée d'affleurement de forme circulaire (Figure 13 et 15). Planche 2 flanc sud-ouest de Mishe Mokwa en gros plan. Sol 4956. Quatorzième année Sol 4976 le 6 août 2026

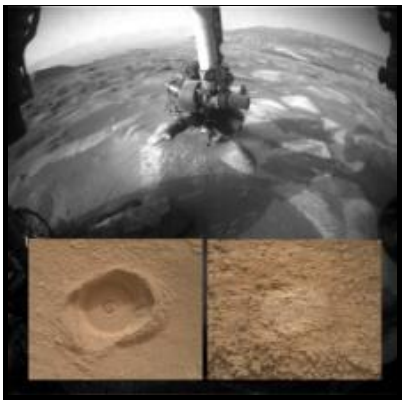


Figure 12 : Sol 4958
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

La composition chimique documentée par l'instrument ChemCam montre une augmentation significative de l'enrichissement en sulfate de calcium (Ca) et en sulfate de magnésium (Mg) variable au sein des crêtes polygonales et d'autres roches nodulaires, tandis que la roche hôte lisse dans les noyaux des polygones a une composition basaltique en vrac avec des détections sporadiques de sulfate de calcium, mais est principalement pauvre en sulfate.

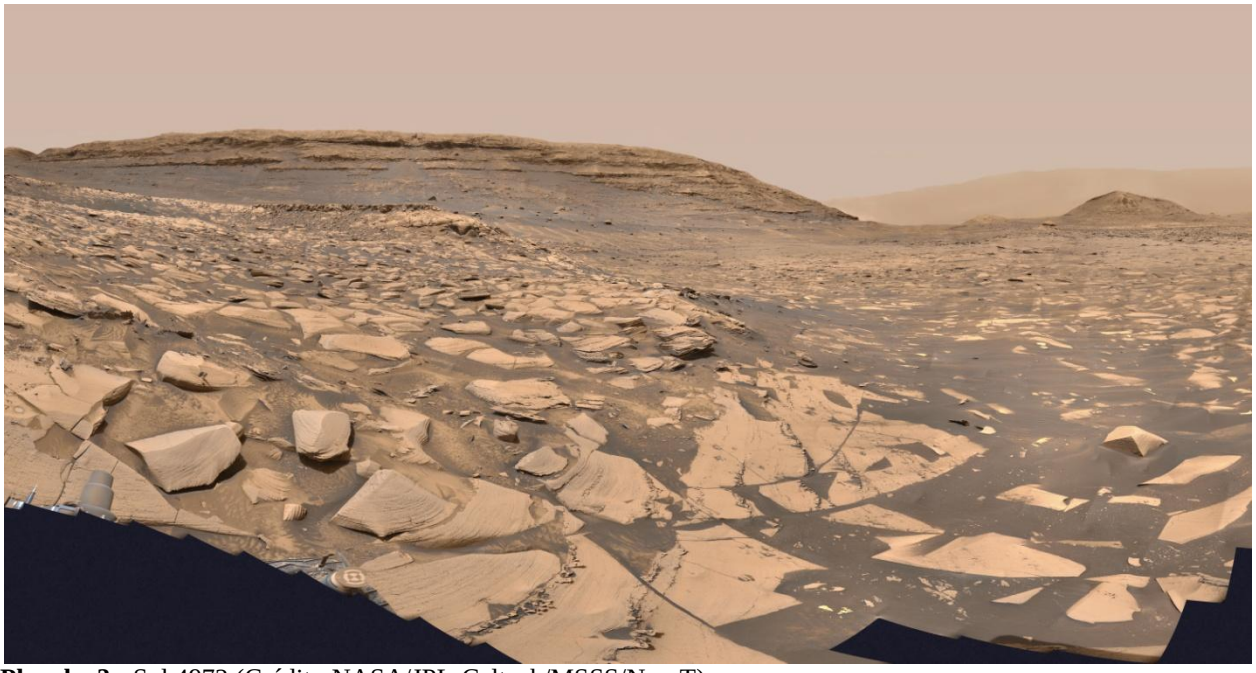


Planche 3 : Sol 4972 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Planche 4 : Sol 5000 30 août 2026 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

Sol 4972 Neville Thompson (NeV-T) **Planche 3** : positionné dans 'Laguna de Laja', le centre de l'image (pointant en direction nord) correspond à la butte Paniri et au fond du cratère Gale (crête nord-ouest), à gauche la butte Kimsa Chata (direction ouest) et à droite la butte Mishe Mokwa (direction est) qui cache la fin de Texoli, le Sud se trouve à chaque extrémité de l'image pointant vers le sommet du mont Sharp et les yardangs.

Sol 4976 Quatorzième année le 6 août 2026: Laguna de Laja
Sol 4994, 1 km (-1 m) d’élévation (-3 500 m, -4 500 m) et 37 807,22 km

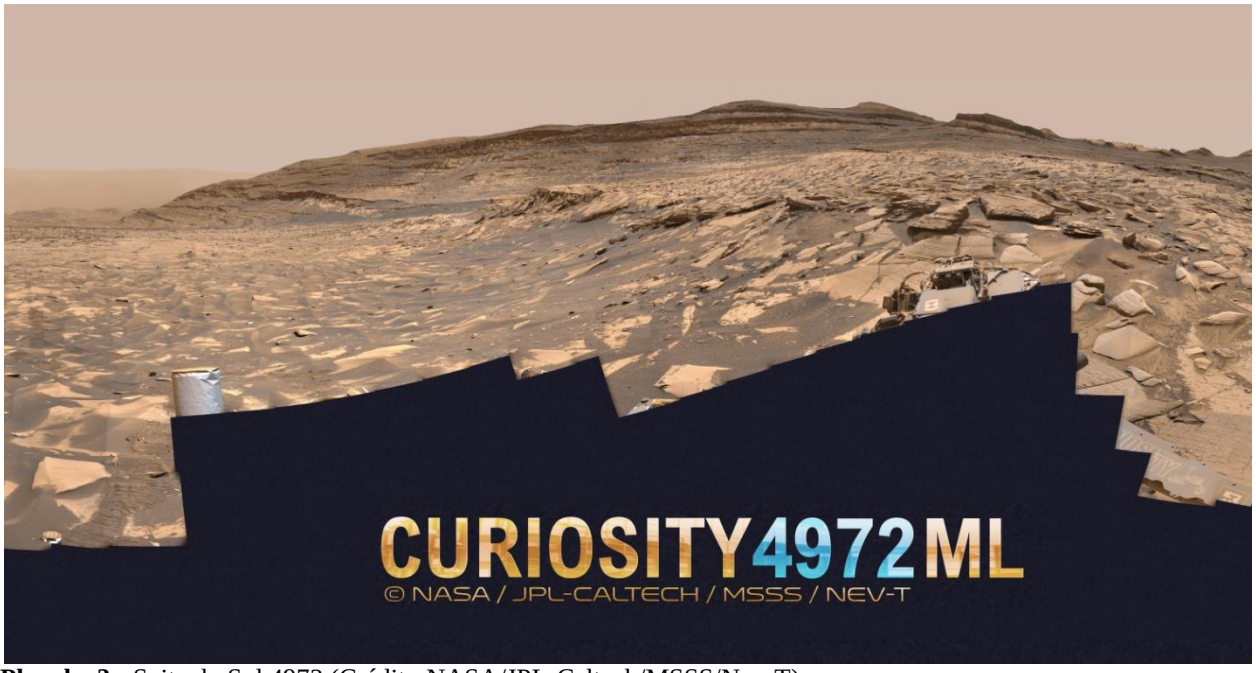


Planche 3 : Suite du Sol 4972 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

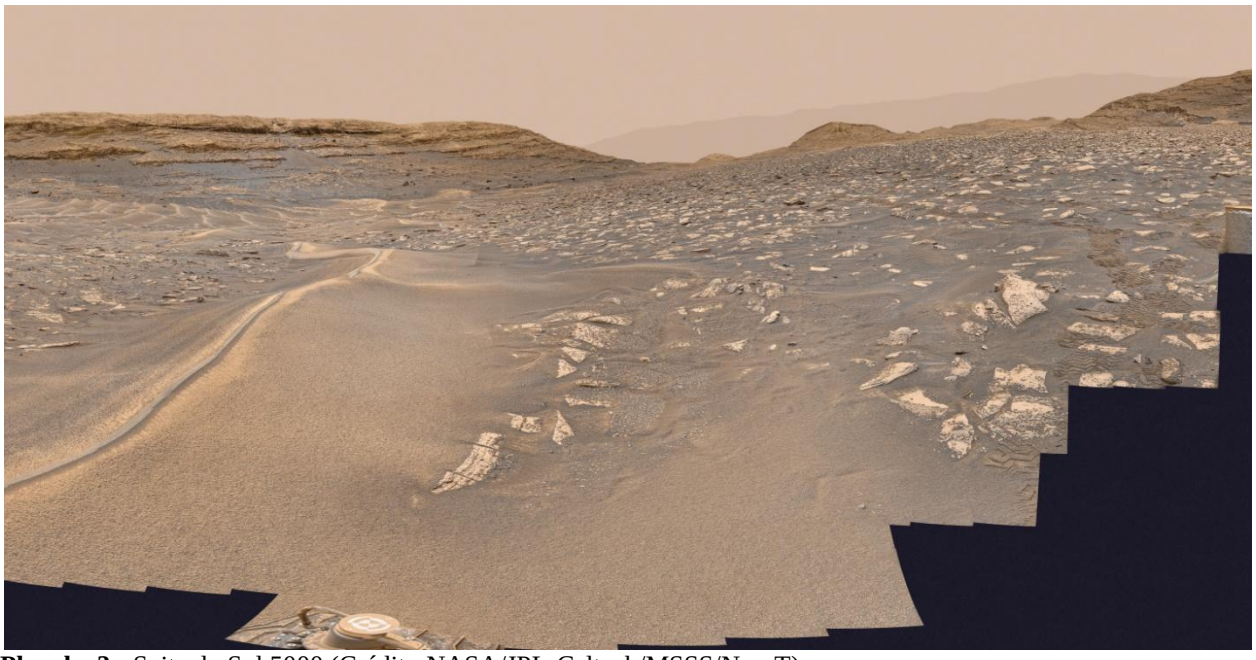


Planche 3 : Suite du Sol 5000 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/Nev-T)

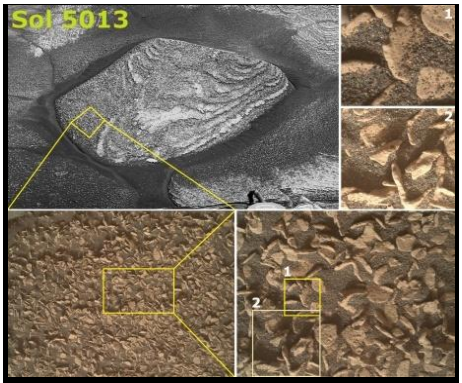


Figure 12 : Sol 5013
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS)

Sol 5013 Sélénite de gypse rose du désert. Source : AstroWest.com. Le gypse rose du désert se forme par un processus rapide d'évaporation et de cristallisation dans des environnements sableux arides proches de la surface… on le trouve aussi bien sur Mars que sur Terre.

Le 21 Septembre (Sol 5021) Curiosity ne s'est déplacé que d'1 m pour se placer devant un affleurement rocheux assez large situé derrière une ondulation de sable.
48^{iem} Forage (Sols 5021-), Sol 5024 le 22 septembre 2026

MAHLI – 14/09 (sol 5014) :

Formations apparentées à la commune "rose des sables" composée principalement de gypse (sulfate dihydraté de calcium) qui emprisonne des grains de sable. Elles se forment généralement en profondeur (plus d'un mètre) où l'eau se charge en minéraux (sulfate de calcium) qui cristallisent et forme des concrétions plus ou moins grandes, souvent en forme de pétales,

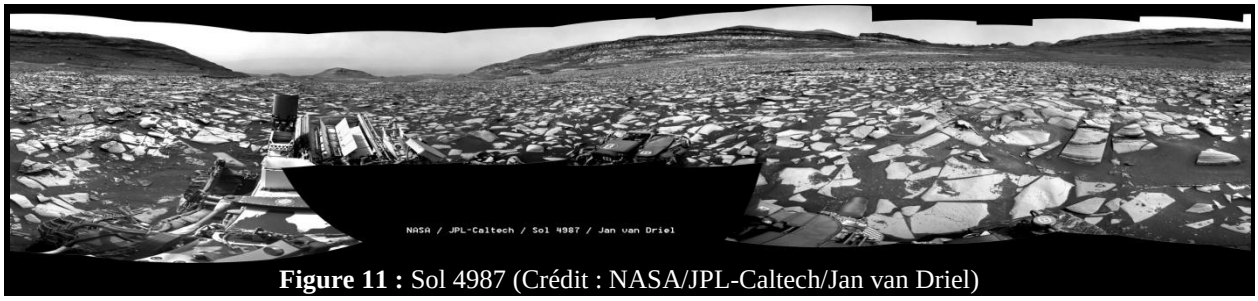


Figure 11 : Sol 4987 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

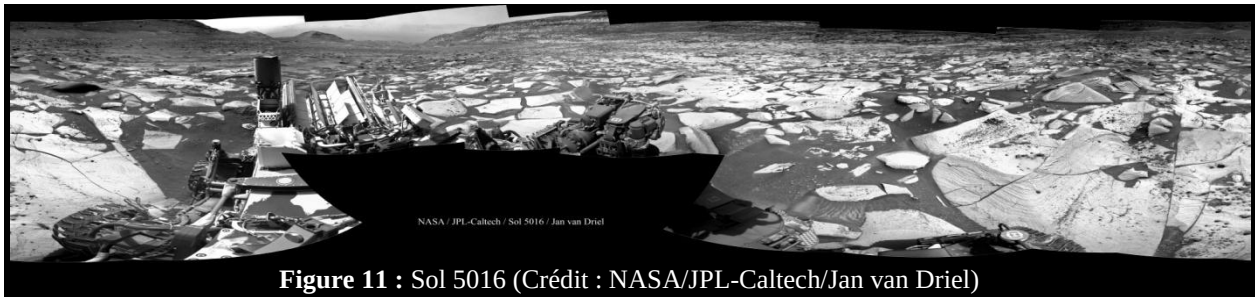
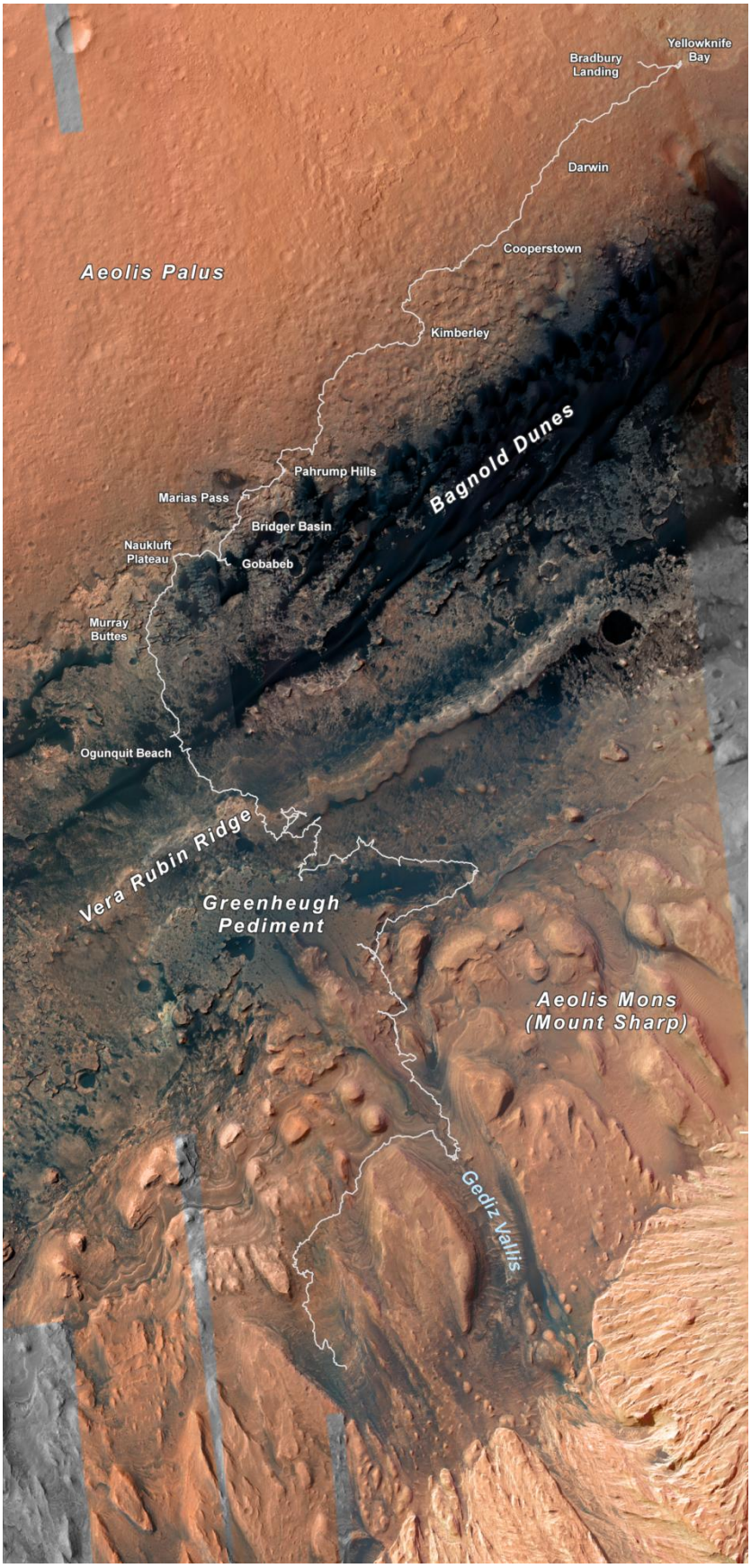


Figure 11 : Sol 5016 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)


Yellowknife Bay
Bradbury Landing
Darwin
Cooperstown
Aeolis Palus
Kimberley
Bagnold Dunes
Pahrump Hills
Marias Pass
Bridger Basin
Naukluft Plateau
Gobabeb
Murray Buttes
Ogunquit Beach
Vera Rubin Ridge
Greenheugh Pediment
Aeolis Mons (Mount Sharp)
Gediz Vallis

Les Panoramiques de l’atterrisseur InSight

La mission InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport, en français : Exploration interne par les sondages sismiques, la géodésie et les flux thermiques), est une mission d'exploration entièrement consacrée à l'étude de la structure interne de la planète Mars faisant partie du programme Discovery de la NASA. Le programme Discovery mis en place au début des années 1990, regroupe une série de projets spatiaux peu onéreux qui inclut des cycles de développement très court dédier uniquement à l'exploration du système solaire, dont InSight est le douzième représentant. L'objectif scientifique principal de la mission est de disposer d'une meilleure connaissance de la structure interne de la planète, pouvant servir à reconstituer l’historique afin de mieux comprendre l'évolution géologique de la planète Mars. Les données collectées permettront également d'améliorer les modèles de formation et d'évolution des planètes rocheuses du Système solaire. La sonde spatiale, construite par Lockheed Martin Space, est basé sur l'architecture de la mission Phoenix qui s'est posée dans la région polaire de Mars le 25 mai 2008. L'atterrisseur se présente sous la forme d'une plateforme de 1,5 mètre de diamètre de 350 kilogrammes, reposant sur trois pieds. InSight tire son énergie grâce à deux panneaux solaires de 2,15 mètres de diamètre qui se déploient à la manière d'un éventail de chaque côté de la plateforme d'atterrissage. Les panneaux solaires pouvant générer jusqu'à environ 3 000 wattheures par jour martien, sont connectés à une paire de batteries lithium-ion rechargeables de 25 ampères par heure située sur l'atterrisseur. Et pour communiquer avec la Terre, l’atterrisseur est équipé d’une antenne radio UHF hélicoïdale (ultra-haute fréquence) et de deux antennes émettant en bande X. Le site étant situé au nord de l'équateur, l'atterrisseur devra être orienté vers le sud pour empêcher l'ombre de l'atterrisseur de passer au-dessus des instruments déployés. La charge utile est composée de trois principaux instruments scientifiques fournie par des partenaires européens.

L’équipement de l’atterrisseur InSight :

L’atterrisseur InSight embarque trois instruments scientifiques principaux : un sismomètre passif SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure), la sonde HP^3 (Heat Flow and Physical Properties Package) et le dispositif RISE (Rotation and Interior Structure Experiment) (Figure 1). La plateforme d’atterrissage dispose également d’une station météorologique complète à forte contribution espagnole APSS (Auxiliary Payload Sensor Suite). La station météorologique est équipée de capteurs de température et d'un anémomètre pour étudier la vitesse et la direction des vents (TWINS), d'un baromètre pour mesurer la pression atmosphérique (Inlet) et d’un réflecteur laser LaRRI (Laser RetroReflector for InSight). Le package APSS comporte également un magnétomètre IFG (InSight FluxGate) pour mesurer le champ magnétique local et les perturbations magnétiques causées par l'ionosphère avec une précision de 0,1 nano tesla. Tout ses instrumenta sont fixé sur le pont de l’atterrisseur. C'est la première fois qu'un instrument de ce type est déposé au sol à la surface de Mars. La plateforme est équipée de deux caméras

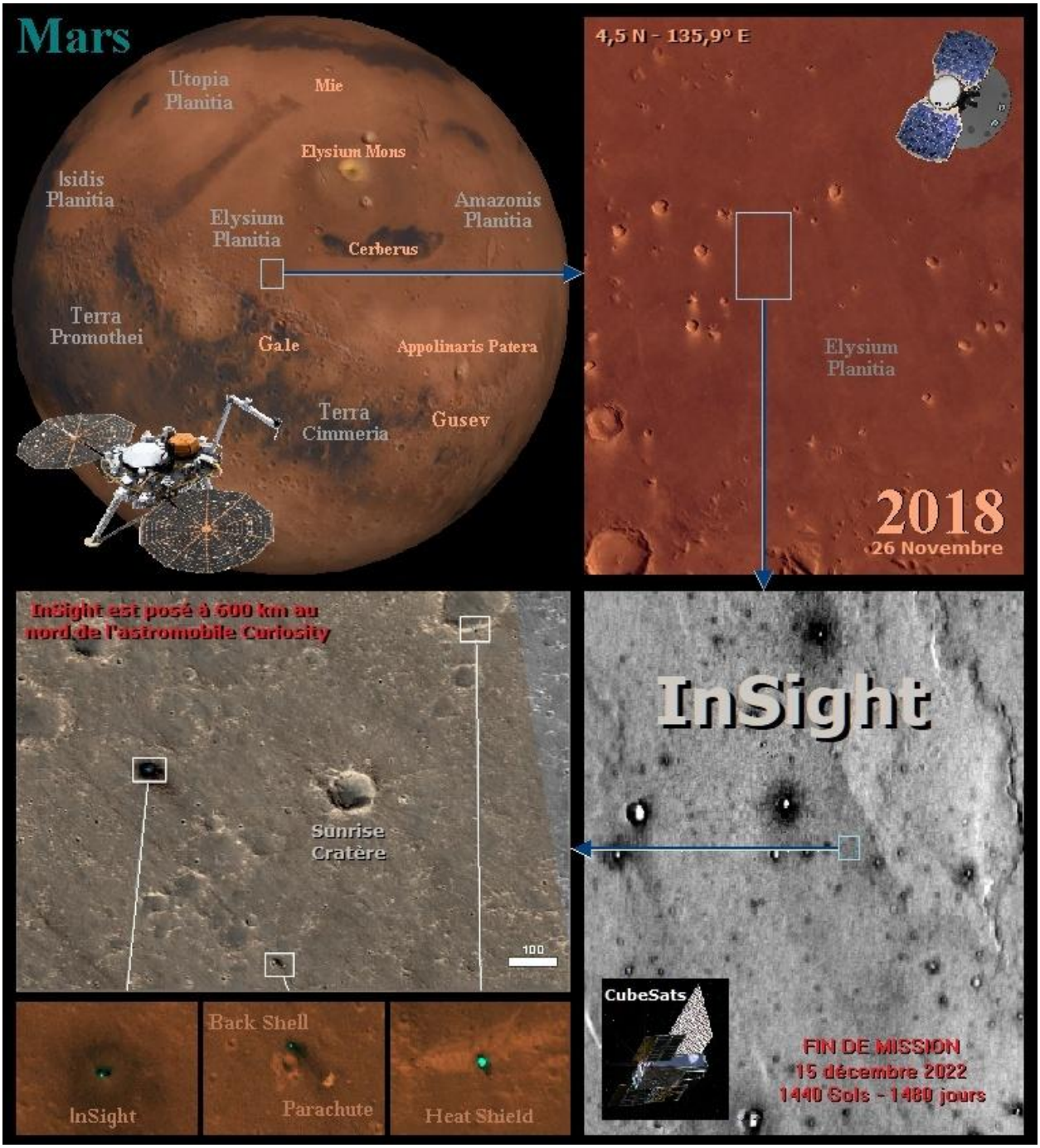


Planche 1 : Le site d'atterrissage de InSight obtenu grâce aux données fournies par la caméra THEMIS (Thermal Emission Imaging System) de l'orbiteur Mars Odyssey de la NASA en mai 2014 (photo en bas à droite). La photo au centre et les trois photos en bas à gauche sont de la caméra HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) prises le 11 décembre (au centre) et le 6 décembre 2018 (en bas). Les 2 photos du haut ayant participées au montage de cette maquette sont des orbiteurs Vikings.

d'ingénierie complémentaires, une étant fixée en dessous du pont de l'atterrisseur et la seconde sur le bras robotique. La caméra fixée sur le bras robotique est de type IDC (Instrument Deployment Camera), elle est chargée d'acquérir des images stéréoscopiques couleur du site d'atterrissage et des instruments fixés sur la plateforme, pouvant également offrir des vues

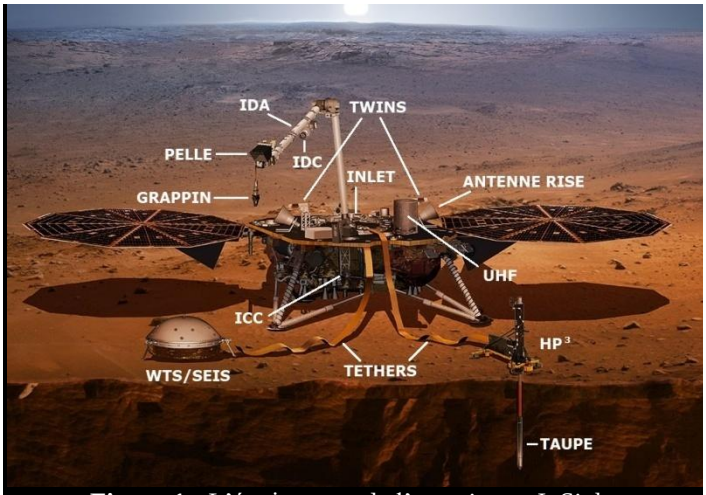


Figure 1 : L'équipement de l'atterrisseur InSight (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

panoramique de 360° du terrain. Elle est similaire aux caméras de navigation (NavCam) des rovers Spirit, Opportunity et Curiosity, et possède un champ de vision de 45° avec un capteur CCD offrant une résolution de 1024x1024. Cette caméra sert dans un premier temps à supporter l'installation des instruments SEIS et HP^3 au sol. La seconde caméra de type ICC (Instrument Context Caméra) est accrochée sous la plateforme de la sonde faisant face à l'espace de travail, elle possède un champ de vision plus large que celui de la caméra IDC (120°). Elle est chargé de fournir des images supplémentaires qui aideront au déploiement, et par la suite de faire le suivit des différentes opérations effectuées par les instruments de mesure au sol. Les images résultantes sont soumises à une compression JPEG pour réduire le volume de données avant la liaison descendante vers la Terre.

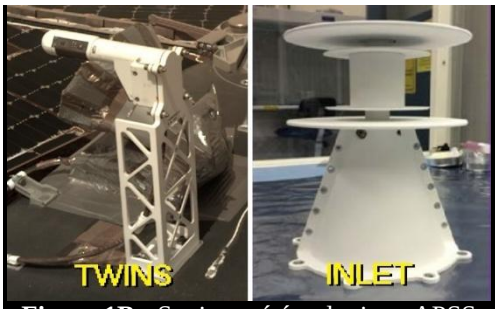


Figure 1B : Station météorologique APSS (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Ensuite nous retrouvons le système de déploiement d'instruments (IDS) de l'atterrisseur, qui comprend un bras robotique de déploiement d'instruments (IDA) de 1,8 mètre de long pour déplacer les instruments du pont vers le sol. Le bras est composé de deux segments avec trois articulations doté de moteurs (épaule, coude et poignet) donnant quatre degré de liberté. Le bras de déploiement d'instruments (IDA) comprend à son extrémité un petit godet (Scoop) et un grappin pour saisir chaque pièce de matériel que le bras soulèvera. Le rôle du godet ou pelle IDA est de préparer au mieux le terrain avant de déposer les instruments, il permet de déplacer de petite pierre qui gêne, d'aplatir un petit monticule, ou simplement de vérifier la nature du sol. Les cinq doigts mécaniques du grappin peuvent se refermer autour d'une poignée qui ressemble à une boule au sommet d'une tige fixée sur les instruments. Les trois éléments désigné à être déplacés sont l'expérience sismique SEIS pour sonder la structure intérieure, la sonde de flux de chaleur et de propriétés physiques HP^3, et le bouclier éolien et thermique (WTS) destiné a recourir le dôme du sismomètre. L'atterrisseur possède également deux caméras couleur pour trouver le meilleur endroit pour placer et documenter le processus. Il s'agit de la caméra de déploiement d'instruments (IDC) installée sur le segment d'avant-bras du bras robotique pour surveiller et guider le transfert des charges à la surface, et de la caméra de contexte d'instrument (ICC) installée sur le corps de l'atterrisseur sous le pont supérieur. D'autres composants sont montés à l'extérieur sur et sous le pont scientifique de l'atterrisseur, comme les unités de mesure inertielle, un radiomètre pour mesurer le flux thermique infrarouge en surface, un magnétomètre et un radar d'atterrissage.

Le sismomètre SEIS (Figure 2) est le fer de lance de la mission InSight, son objectif est d'enregistrer les tremblements de Mars et les impacts météoritiques. Il comprend six capteurs de

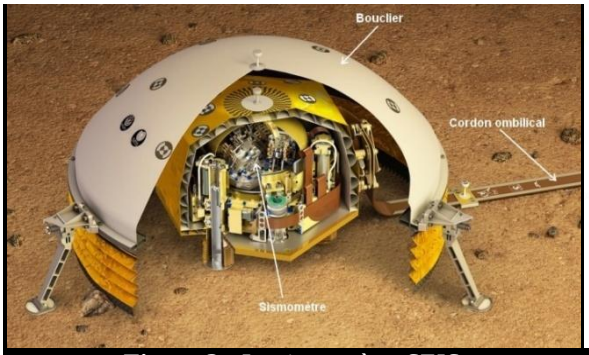


Figure 2 : Le sismomètre SEIS
(Crédit : PGP/David Ducros)

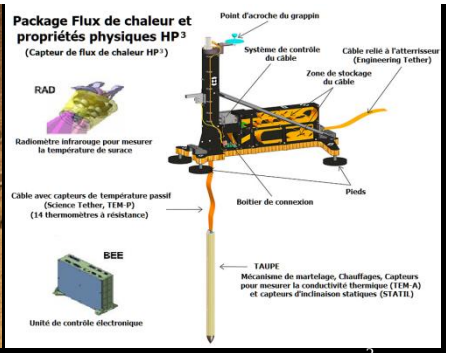


Figure 3 : L'instrument HP^3
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/DLR)

deux types différents montés sur une structure de nivellement de précision à trois pieds à l'intérieur d'un boîtier d'enceinte de couleur ocre (RWEB) chauffé à distance. SEIS possède 3 capteurs à très large bande (VBB) pouvant détecter des vibrations entre 0,001 et 10 Hz, et 3 capteurs à courte période (SP) capables d'enregistrer des déplacements plus rapides entre 0,1 Hz et 40 Hz (Université d'Oxford et le Collège Impérial de Londres). L'instrument a été conçu et développés par la France grâce à une collaboration entre le Centre National d'Études Spatiales (CNES) et l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP)[42], qui a construit et qui est responsable de l'instrument. Fruit d'une vingtaine d'années d'efforts et de recherche, l'instrument SEIS est un véritable petit bijou de technologie, il est capable de mesurer seul sans avoir besoin d'utilisé plusieurs appareils pour déterminer la triangulation sur l'origine des évènements sismiques. Un mécanisme d'horlogerie unique au monde, spécialement conçu pour fonctionner dans l'environnement hostile martien. Au cœur de l'appareil se trouvent trois pendules ultra-sensibles orientés dans les trois directions de l'espace, qui détecteront les plus infimes mouvements de la surface martienne. Sa sensibilité est mille fois supérieure à celle du sismomètre des sondes Vikings, et contrairement à ce dernier qui était resté fixé sur l'atterrisseur, SEIS sera placé directement au contact du sol par un bras robotique. Sur Mars, le facteur le plus hostile aux sismomètres est l'énorme variation de température qui ont lieu entre le jour et la nuit, et au cours des saisons. Pour ce protégé de ses variations thermiques, le sismomètre SEIS possède plusieurs barrières thermiques. A l'image d'une poupée russe, les trois pendules sont installés dans une sphère en titane ou règne un vide poussé. Cette sphère est recouverte par un couvercle de protection alvéolée qui utilise l'atmosphère martienne comme isolant thermique supplémentaire.

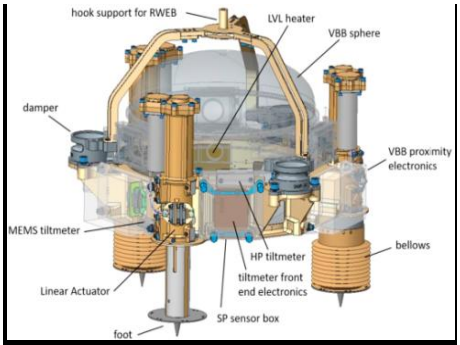


Figure 2B : Le sismomètre SEIS
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/IPGP)

L'ensemble est ensuite placé sous un lourd bouclier thermique et éolien (WTS), dont le rôle est de minimiser les contrastes thermiques et d'offrir une protection contre les rafales de vents. Dans un premier temps, le bras saisira le sismomètre pour le poser au sol. Un cordon ombilical semi-rigide (Tether) relie le sismomètre à un boitier électronique situé à l'intérieur de l'atterrisseur InSight, et qui permet l'alimentation électrique, la numérisation des signaux et l'échange des données avec l'ordinateur de bord de l'atterrisseur. La sphère contenant les pendules est montée sur un berceau métallique doté de trois pieds motorisés, qui

[42] SEIS (Seismic Experiment for Interrior Structure)

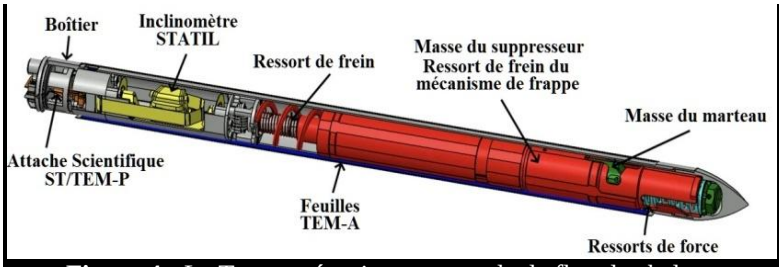


Figure 4 : La Taupe mécanique, ou sonde de flux de chaleur (Crédit : NASA/JPL-Caltech/DLR)

permet une mise à niveau très précise par rapport à l'horizontale. La qualité de l'installation au sol est effectivement primordiale pour assurer un fonctionnement optimal du sismomètre. Le sismomètre SEIS d'InSight surveillera les impacts de météorites, l'effet de marée provoqué par la petite lune Phobos, et les soubresauts de l'atmosphère (chute de pression brutal, tempêtes locales et tourbillons de poussière, etc.). En chutant régulièrement des profondeurs de l'espace sur la surface de la planète rouge, les météorites en forment des cratères dégageant une quantité considérable d'énergie lors de leur impact. Une partie de cette dernière est libérée sous la forme d'une onde sismique de choc, à laquelle SEIS prêtera une oreille bien attentive. Les capteurs TWINS de la station météorologique, seront utilisés pour calibrer et pour indiquer à SEIS quand des vents forts pourraient interférer avec de petits signaux sismiques.

L'instrument HP^3 (Figure 3 et 4) est une sonde de chaleur développée par l'Allemagne dont l'objectif est de mesurer le gradient thermique de la planète. Le deuxième instrument scientifique fournira la première détermination précise de la quantité de chaleur s'échappant de l'intérieur de la planète. Le bras robotique d'InSight placera l'instrument sur le sol, où une taupe mécanique auto-martelant de 39,6 centimètres de long et de 2,7 centimètres de diamètre (pénétrateur jouant le rôle de foreuse), pourra être propulsée grâce à un mécanisme à percussion électromagnétique utilisant deux masses à ressort, qui sont comprimées puis relâchées périodiquement pour creuser jusqu'à une profondeur de 3 à 5 mètres pendant environ 30 jours (Viking 1 a creusé à 22 centimètres et Phoenix à 18 centimètres). Sous l'action d'un champ magnétique, le moteur soulève deux masses coulissantes et tend leurs ressorts respectifs jusqu'à ce que chacune soit relâchée vers l'avant pour impacter la coque intérieur de l'enclume de la pointe de la taupe, puis ramenée en arrière histoire de pouvoir engager une nouvelle frappe. Le cycle de martelage lui-même ne dure pas plus de 200 millisecondes et fait avancer la taupe entre 0,1 et 1 millimètre par coup en fonction de sa profondeur[43]. A chaque coup selon la densité du régolithe, le petit stylo rentrera un peu plus profondément dans le sol. Le package du système HP^3 déroule derrière lui un câble (ruban) électrique relié à l'atterrisseur de 3,5 mètres de long (ST: Engineering Tether). La taupe est également équipée d'une suite de mesures thermiques actives (TEM-A), d'un accéléromètre et d'un inclinomètre combinés (STATIL). La taupe est relié au corps du système de support HP^3 par un câble électrique flexible de 5 mètres de long (ST: Science Tether), ainsi qu'un ruban souple bardé de quatorze capteurs de température positionnés à intervalles réguliers tous les 35 centimètres (TEM-P sensors), pouvant faire des mesures thermiques passives. Cet alignement de capteur sert à déterminer le gradient thermique du flux de chaleur provenant du noyau de la planète. La taupe s'arrête tous les 50 cm environ pour se réchauffer pendant quelques jours, puis les capteurs vérifient la rapidité avec laquelle la température se dissipe, ce qui indique la conductivité du sol.

La sonde thermique d'InSight pénétrera plus de 15 fois plus profondément sous la surface que n'importe quel matériel précédent sur Mars. Les mesures aideront entre autre a quantifié le

[43] Spaceflight101.com, InSight Instrument Overview

Figure 5 : InSight sans le bouclier WTS (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Lockheed Martin)

refroidissement de la planète au cours du temps, depuis sa formation jusqu'à aujourd'hui. Obtenir de nouvelles données sur l'histoire thermique de Mars, peut aider à mieux comprendre les causes qui ont provoquées la perte de son champ magnétique protecteur, au cours duquel Mars perd lentement son atmosphère passant d'une planète capable d'héberger la vie au monde déserté que nous voyons aujourd'hui. Le Centre aérospatial allemand (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, ou DLR)[44], dont le siège est à Cologne, a fourni la sonde de flux thermique et de propriétés physiques d'InSight.

RISE (Rotation and Interior Structure Experiment : Expérience de rotation et de structure intérieure) est la troisième expérience scientifique à être mené durant la mission sur Mars, elle consiste à faire une expérience de géodésie en utilisant la connexion radio directe d'InSight avec la Terre pour évaluer les perturbations de l'axe et le taux de rotation planétaire de Mars, ce qui peut fournir des informations sur le noyau de la planète. Les outils de l'expérience RISE sont la radio en bande X de l'atterrisseur InSight et les grandes antennes paraboliques du Deep Space Network de la NASA, qui groupes les antennes paraboliques réparties sur trois sites : Californie, Espagne et Australie. La liaison radio de l'atterrisseur avec la Terre fournira un suivi précis de l'emplacement d'un site à la surface pendant la rotation de la planète tout au long d'une année martienne. L'objectif est d'analysé le décalage doppler des ondes radio émises en bande X par l'atterrisseur InSight, afin de mesurer au mieux les mouvements très subtils de la rotation du globe martien (rotation propre, précession des équinoxes et nutation). La façon dont la planète oscille lorsqu'elle tourne sur elle-même, dépend de la manière dont les éléments qui constituent son intérieur sont distribués. L'expérience RISE permettra en particulier de confirmer la nature liquide ou solide du noyau martien. InSight apportera ainsi le quatrième jeu de données avec celles déjà obtenues par les atterrisseurs Viking et Pathfinder, et par intermittence par les Mars Exploration Rovers (MER) Spirit et Opportunity.

La principale méthode d'envoi de données vers la Terre depuis le site d'atterrissage, sera effectuée via un relais UHF vers un orbiteur et l'antenne hélicoïdale de l'atterrisseur. Les orbiteurs Mars Reconnaissance Orbiter et Mars Odyssey passeront chacun deux fois par jour dans le ciel martien au-dessus d'InSight. L'orbiteur MAVEN de la NASA ainsi que le Trace Gas Orbiter et Mars Express de l'Agence spatiale européenne peuvent également servir de relais de secours pour InSight. Les orbiteurs recevront les transmissions d'InSight via UHF et relayeront les données InSight vers la Terre via la bande X. Les principales utilisations de la radio en bande X d'InSight sont l'expérience de rotation et de structure intérieure (RISE), et la réception de commandes directement depuis la Terre. Le système informatique de bord dispose de deux ordinateurs redondants : l'un actif à tout moment et l'autre disponible en sauvegarde. Le cœur de l'ordinateur est un processeur central résistant aux radiations avec une architecture PowerPC 750 appelé RAD 750. Ce processeur fonctionne à une vitesse de 115,5 mégahertz, contre 20 mégahertz pour le processeur RAD6000 utilisé sur Mars Phoenix.

[44] Deutsches Zentrum fur Luft-und Raumfahrt, German Aerospace Center (DLR)

Transite et Atterrissage

Figure 6 : Lancement de InSight
(Crédit : United Launch Alliance)

Un problème de mise au point sur l'étanchéité de l'enceinte placée sous vide de l'instrument SEIS, repousse le lancement de la mission qui était initialement prévu pour 2016. La sonde InSight est finalement lancée le 5 mai 2018 à 4h05 par une fusée Atlas V 401 sur le site du Launch Complex n°3 de la base aérienne de Vandenberg de Californie (Figure 6). Il s'agit du premier lancement interplanétaire historique effectué depuis la côte ouest américaine. Lors de son lancement, lnsight était accompagné par deux microsatellites appelés Mars Cube One (MarCO A & B), équipé de deux panneaux solaires, de deux antennes expérimentales fonctionnant en UHF (réception) et en bande X (émission et réception), et de petite caméra à champ large avec une résolution de 752x480 pixels. De la taille d'une petite valise et totalement autonomes, ils voleront en formation derrière la sonde et auront pour objectif de tester de nouveaux équipements de communication miniaturisés dans l'espace lointain (CubeSat). En arrivant près de Mars, les MarCO pourront relayer les données de la sonde InSight lors de son entrée dans l'atmosphère martienne, et de couvrir ainsi la phase cruciale de l'atterrissage (les 7 minutes de terreur !) en relayant les communications avec la Terre. Il s'agit d'un premier test de la technologie CubeSat miniaturisée sur une autre planète. En cas de succès, les MarCO pourraient représenter un nouveau type de capacité de communication avec la Terre pour de futures missions d'exploration interplanétaire. Les CubeSats ont parfaitement rempli les objectifs qui leur étaient fixés, et ils ont réussies à relayer les données de l'atterrisseur vers la Terre lors de la descente vers la surface martienne. Le CubeSats MarCO-B qui s'éloignait de la planète après l'atterrissage d'InSight, a pris une image de la planète Mars le 26 novembre 2018 à environ 7 600 kilomètres (Figure 7). Les communications avec Marco-B et Marco-A sont perdues respectivement le 29 décembre 2018 et le 4 janvier 2019.

Figure 7 : CubeSats MarCO-B
(Crédit : United Launch Alliance)

Après six corrections de trajectoire pour ajuster son itinéraire de vol vers Mars, connus sous le nom de « manœuvres de correction de trajectoire » ou TCM. Ajustement qui a été effectués le 15 mai, le 26 juin, le 28 juillet, le 12 octobre, le 18 novembre et le 25 novembre 2018. Le module de croisière d'InSight guidé par huit moteurs de croisière Aerojet Rocketdyne, aura parcourus une distance de 485 millions de kilomètres dans le vide et la froideur de l'espace en 205 jours (près de 7 mois) durant le transite vers Mars. InSight arrive finalement à sa destination et se prépare à atterrir sur la planète Mars. Les orbiteurs Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) et Mars Odyssey de la NAZA, ainsi que Mars Express de l'agence spatiale Européenne (ESA), sont misent à contribution pour assister et surveiller l'atterrissage d'InSight sur Mars. La valeur de l'angle d'attaque formé entre le plan horizontal et la trajectoire de la sonde au moment de l'entrés dans l'atmosphère martienne, doit impérativement être de 12,5°. Si la valeur de l'angle d'attaque est plus importante, la sonde va se désintégrer en une boule de feu lors de son entrer dans

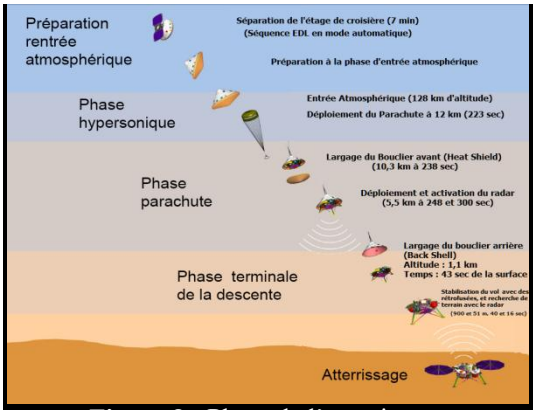


Figure 8 **:** Phase de l'atterrissage
(Crédit : United Launch Alliance)

l'atmosphère, et si l'angle est au contraire inférieur la sonde va rebondir sur l'atmosphère et se perdre à jamais dans les profondeurs du système solaire. Contrairement à Phoenix qui a atterrit dans les bases terre du Nord de la dichotomie martienne, InSight qui pèse plus lourd va devoir atterrir plus au Sud dans une région ayant une altitude plus élevée d'environ 1,5 kilomètre. La colonne d'air disponible pour le freinage sous parachute sera moins importante. La phase d'entrée, de descente et d'atterrissage (EDL) commence sept minutes avant le contacte avec l'atmosphère martienne par le largage de l'étage de croisière. Trente secondes après la séparation, InSight bascule lentement sur elle-même pour pointer son bouclier thermique conique de 2,65 mètres de diamètre vers l'avant en direction de Mars. Le module d'atterrissage d'InSight pénètre les hautes couches de l'atmosphère martienne à environ 128 kilomètres au-dessus de la surface à une vitesse de 5,9 kilomètres par seconde (Figure 8). La chaleur produite par le frottement atmosphérique porte le bouclier thermique avant (Heat Shield) à une température de plus de 1 500 °C. A ce moment là, il se forme un plasma de gaz ionisés qui enveloppe le module d'atterrissage et qui va perturber toute forme de communication. Il s'agit de la phase critique des sept minutes de terreur.

Figure 9 **:** Descente
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

L'ouverture du parachute de 11,8 mètres de diamètre s'effectue 3,7 minutes après le début de la rentrée atmosphérique à 12 kilomètres au-dessus du sol, et la vitesse de descente chute à 415 mètres par seconde. Le bouclier thermique avant (Heat Shield) est éjecté 15 secondes plus tard à une altitude de 10,3 kilomètres, ce qui dégage le champ de vision des antennes du radar fixées sous l'atterrisseur, puis c'est le tour du train d'atterrissage à être déployé. À une altitude d'environ 5,5 kilomètres, cinq minutes après l'entrée dans l'atmosphère, le radar altimétrique est activé 52 secondes après le déploiement des trois pieds de la sonde, et commence à faire le balayage du terrain douze seconde plus tard à une altitude d'environ 2,3 kilomètre. Le radar détermine en permanence l'altitude et la vitesse verticale et horizontale de descente par rapport au sol. Vingt secondes plus tard rendue à une altitude d'environ 1 100 mètres du sol, le module d'atterrissage largue son parachute et la coque de protection arrière (Bach Shell) qui ne sert plus à rien. Le module est maintenant en chute libre durant 3 secondes, et une fois l'atterrisseur a atteint une distance sécuritaire suffisante de sa coque arrière et de son parachute, trois grappes de quatre petits moteurs-rétrofusées de contrôle d'attitude sont aussitôt mis en marche qui stoppe nette la chute libre. Les moteurs ont freiné l'engin et l'ordinateur de bord aide à stabiliser le module durant le reste de la descente. A une altitude de 51 mètres et à seize secondes avant de toucher le sol, la vitesse est stabilisée à 7,7 m/s (Figure 9). Durant la phase finale de la descente, InSight doit tourner sur elle-même de façon à orientées les panneaux solaires d'ouest en Est une fois au sol, et que le secteur de déploiement des instruments situé devant le bras robotique soit face au Sud, de façon a protéger la zone de travail de l'ombre projeter au sol par les panneaux solaires. Dès que le contact physique avec le sol est capté par l'un des pieds, les moteurs s'arrêter immédiatement pour ne pas risquer d'entraîner le retournement de la sonde et de mettre fin à la mission.

InSight et l'Exploration Martienne

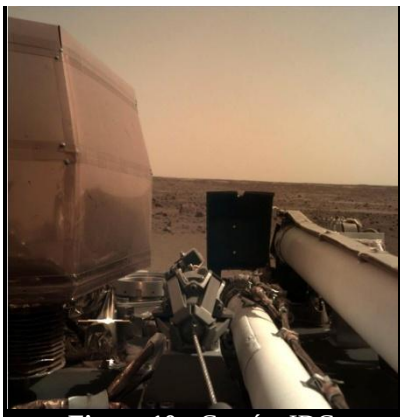


Figure 10 : Caméra IDC
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

InSight se pose en douceur à la surface de Mars le 26 novembre 2018 à 19h52 UTC à 4.5° de latitude Nord par 135.9° de longitude Est, dans la vaste plaine baptisée Elysium Planitia situé près de l'équateur de la planète (Planche 1). InSight s'est posé à plus de 600 km au nord du site d'atterrissage de l'astromobile Curiosity situé dans le cratère Gale. L'atterrisseur s'est posé sur le côté ouest d'un petit cratère d'impact peut profond dénommer « Homestead Hollow » d'environ 27 mètres de diamètre, rempli de poussière et de sable donnant à la sonde une faible inclinaison de 4°. InSight a atterri sur Mars un mois et 10 jours après l'arrivé du solstice d'hivers (17 octobre 2018) dans l'hémisphère nord de la planète, en plein milieu de la saison des tempêtes de poussières. La phase initiale d'étude scientifique est prévue pour une durer nominale de deux années terrestres. Les opérations effectuées juste après l'atterrissage sont entièrement exécutées de manière automatique sans avoir besoin de l'intervention du centre de contrôle basé sur Terre. Après que la poussière soulevée par les rétrofusées soit retombée, les panneaux solaires son les premier à être déployés 30 minutes après l'atterrissage. L'énergie produite par les panneaux solaires est de 4 588 Wh (wattheures) par jour martien, InSight bénéficie d'une quantité d'énergie suffisante pour faire des activités de surface, et l'énergie est largement supérieure aux engins martiens d'exploration de surface qui l'ont précédé (Phoenix : 1 800 Wh, Curiosity : 2 806 Wh et Mars Exploration Rover : 922–994 Wh).

Figure 11 : Caméra IDC
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Une fois au sol, le premier objectif est d'activer et de vérifier les différents équipements de l'atterrisseur et de déployer les deux instruments principaux sur le sol. La première image prise par la caméra contextuelle (ICC) fixé sous le pont de l'atterrisseur, et malgré la présence d'un cache transparente de protection, est recouvert de poussières martiennes qui se sont glissées sur l'objectif. Malgré ce défaut les images restent toujours exploitables. Tandis que la première image prise par la caméra de déploiement d'instruments (IDC), située sur le bras robotique de l'atterrisseur InSight quelque minutes après l'atterrissage est très nette (Figure 10). La cache anti-poussière transparente de l'appareil, qui empêcher les particules soulevées lors de l'atterrissage de se déposer sur l'objectif de l'appareil photo, n'a pas encore été enlevé et est toujours présente sur cette image. L'image donne sur le petit godet (Scoop) fixé sur la partie avant du bras robotique (IDA) et le grappin avec ses cinq doigts mécaniques repliés, qui sera utilisé pour saisir chaque pièce de matériel qui devra être déplacés, suivit à gauche du sismomètre SEIS. L'image dévoile un terrain plat très peu accidenté avec seulement quelques petits rochers aux alentours. Un terrain semblable à ceux déjà rencontré au site d'atterrissage des rover Spirit et Curiosity. Le bras robotique d'une portée d'environ deux mètres est débloqué dès le lendemain au Sol 2 le 27 novembre 2018 (un Sol équivaut à un jour martien équivalent à 24h40 min).

Une nouvelle image de la caméra de déploiement d'instruments (IDC) est prise le 4 décembre 2018 au Sol 8 (Figure 11), qui montre le bras en cours de déploiement et certain instruments se trouvant sur le pont supérieur du vaisseau spatial, avec en arrière plan la vaste pleine d'Elysium Planitia. Au premier plan, nous retrouvons le couvercle hexagonal de couleur cuivre qui protège l'instrument SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure), un sismomètre qui mesurera les tremblements de terre sur Mars. Derrière le sismomètre SEIS se trouve un dôme gris, il s'agit du bouclier anti-vent et thermique (WTS) qui sera placé au-dessus de SEIS. À gauche se trouve un instrument cylindrique noir, il s'agit de la partie avant de la sonde de flux thermique et de propriétés physiques (HP^3), qui doit forer jusqu'à 5 mètres sous la surface martienne pour mesurer le flux de chaleur dégagée de l'intérieur de la planète. Au-dessus du pont nous retrouvons le bras robotique d'InSight avec le grappin rangé directement face à la caméra.

Pour la première fois dans l'histoire de l'exploration martienne, les bruits du vent soufflant sur la planète rouge ont été entendus le 1er décembre 2018 (Sol 6) à 12h30 heure local de Mars (LMST). Les capteurs InSight ont capturé et enregistré un grondement sourd et obsédant provoqué par les vibrations du vent sur les panneaux solaires, ayant une vitesse estimé de 5 à 7 mètres par seconde et soufflant du nord-ouest vers le sud-est. Deux capteurs très sensibles sur le vaisseau spatial ont détecté ces vibrations du vent : le capteur de pression atmosphérique (INLET de la station météorologique du package APSS) à l'intérieur de l'atterrisseur et le sismomètre (SEIS) posé sur le pont de l'atterrisseur (en attente de déploiement par le bras robotique d'InSight). Les deux instruments ont enregistré le bruit du vent de différentes manières. Le capteur de pression atmosphérique (INLET), qui fait partie de la suite de capteurs de charge utile auxiliaire (APSS) ayant la tache de collecter les données météorologiques, a enregistré directement ces vibrations de l'air grâce aux données de pression atmosphérique, pour rappelle l'atmosphère martienne ne représente environ que 1% de l'atmosphère terrestre. Tandis que le sismomètre (SEIS) a mesuré directement les vibrations provoquées par le passage du vent se déplaçant sur les panneaux solaires d'InSight, enregistrement effectué grâce à ses capteurs à courte période SP. Les panneaux solaire mesurent chacun 2,2 mètres de diamètre déployés de chaque côté de l'atterrisseur, ils offrent une certaine résistance au vent agissant comme de véritables récepteurs acoustiques. Les enregistrements des données de vibrations seront utilisés plus tard pour annuler le bruit de l'atterrisseur lorsque le spectromètre SEIS sera installé à la surface, car elles pourraient parasiter les détections de tremblements de Mars.

Depuis la mission Mars 2020 et du rover Perseverance de la NASA (2021), qui embarque deux microphones à son bord fourni par le JPL, il est désormais possible d'écouter le son produit dans l'environnement martien. Il s'agit du microphone Entry Descent and Landing (EDL), dont une partie est situé à l'intérieur du corps du rover et l'autre qui constitue les "oreilles" est fixé sur le côté extérieur du corps du rover. Sa mission est d'enregistrer les sons lors de l'atterrissage, nous donnant ainsi l'occasion d'entendre la friction de l'atmosphère, les vents et les bruits de poussière déplacés lorsque le rover atterrit. Le second microphone fait partie de la boîte à outils de SuperCam, et sera capable de détecter le son du laser de l'instrument lorsqu'il zappe différents matériaux. Cela aidera à identifier ces matériaux en fonction du changement de fréquence sonore.

InSight exécute son premier autoportrait (selfie) au Sol 10 le 6 décembre 2018 (Figure 12 et 13), une mosaïque composée de 11 images prise à l'aide de la caméra de déploiement d'instruments (IDC). Il s'agit du même processus d'imagerie utilisé par la mission Curiosity de la NASA, dans lequel de nombreuses images superposées sont prises à l'aide de la caméra IDC lors

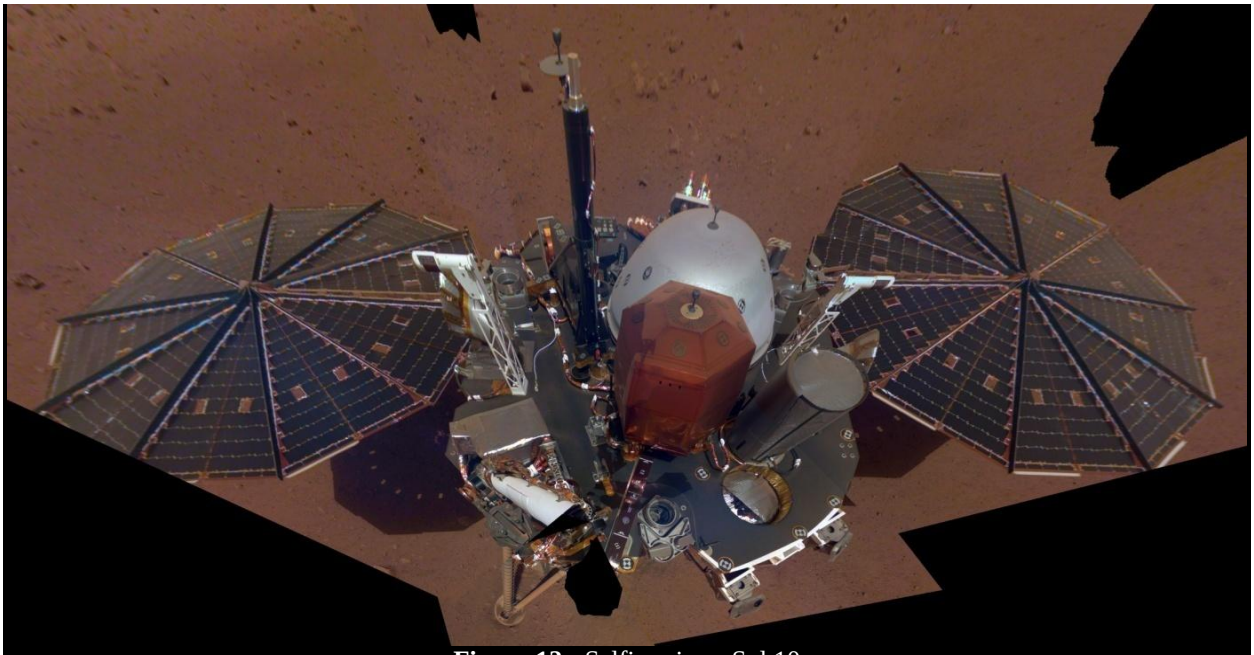


Figure 12 : Selfie pris au Sol 10
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

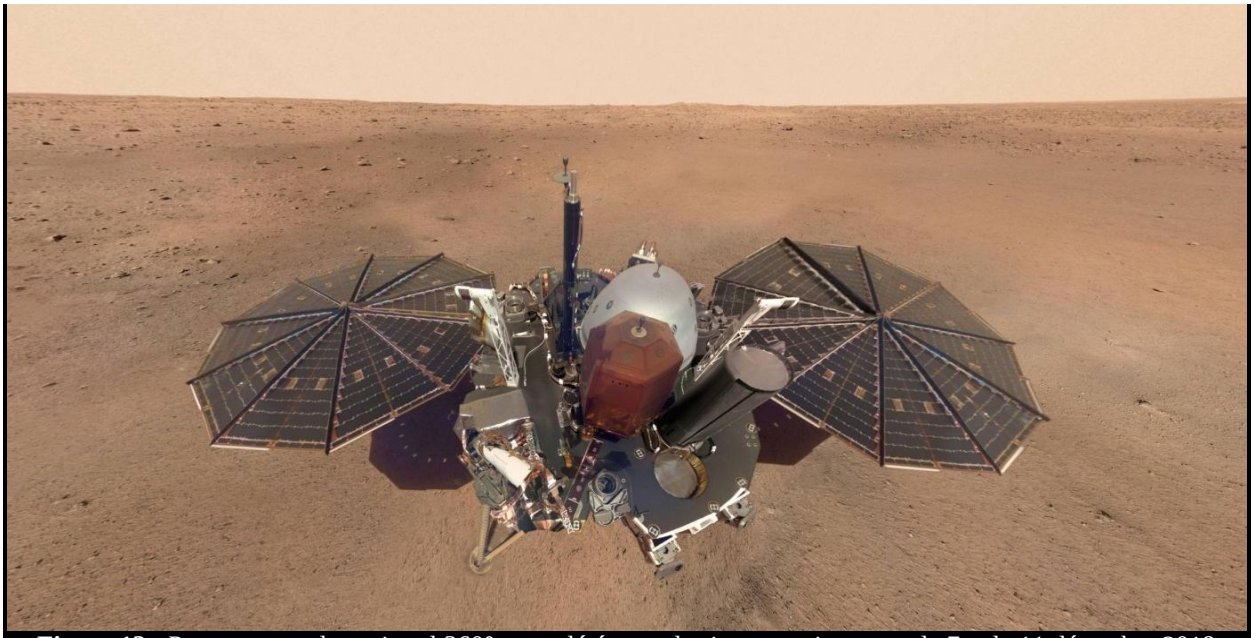


Figure 13 : Panorama couleur virtuel 360°, complété avec des images prises entre le 7 et le 11 décembre 2018
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Andrew Bodrov)

du déplacement du bras robotique (IDA) puis assemblées. Le panneau solaire de l'atterrisseur et l'ensemble de son pont, y compris ses instruments scientifiques, sont visibles sur le selfie. Sur le même Sol, la zone d'atterrissage d'InSight a été repérée et photographiée dans une série d'images par la caméra HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), alors que la sonde spatiale survolait la zone à une altitude de 271,5 kilomètres. Les images ont été prises le 6 décembre (Sol 10), puis de nouveau le 11 décembre 2018 (Sol 15) lors d'un second survole. Des images de très bonne qualité montrant l'atterrisseur, le bouclier

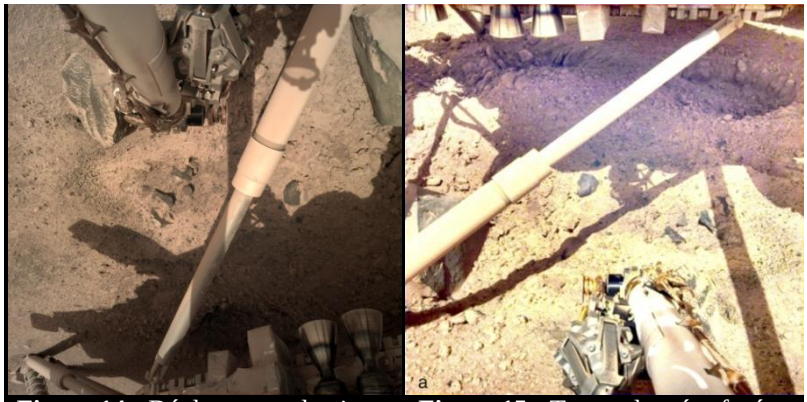


Figure 14 : Déplacement de pierre **Figure 15 :** Traces des rétrofusées (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

thermique ainsi que le parachute avec sa coque arrière (Planche 1).

Avant d'effectué des manœuvres de déplacement d'appareils ou de nettoyage sur le terrain avec le bras robotique IDA, pour des raisons de sécurité afin d'éviter des bris de matériel accidentel. L'équipe d'InSight dispose d'un modèle jumeau de l'atterrisseur dénommé ForeSight, qui permet de tester les opérations avant qu'elles n'aient lieu sur Mars. Les roches plus grosses peuvent présenter un défis, tant pour l'atterrisseur que pour les instruments qu'il placera à la surface de la planète. Les câbles d'alimentation, de pilotage et de réception des mesures qui relient les instruments au vaisseau spatial, doivent-êtres déposés sur le sol sans risque de s'accrocher et d'être user par l'action du vent balançant les câbles sur des roches aux arrêtes trop aigus. Un contrôle du terrain sous l'atterrisseur suivit d'un petit nettoyage est requis et exécuté entre les Sols 14 et 18 du 11 au 15 décembre 2018 (Figure 14 et 15), entre autre pour déplacer un gros roché qui est trop près du point de chute du câble d'alimentation du sismomètre SEIS. Les images dévoilent également des petites fosses sous l'atterrisseur d'environ 50 cm de diamètre sur 10 cm de profondeur, qui ont été creusées par les rétrofusées pulsées lors de l'atterrissage.

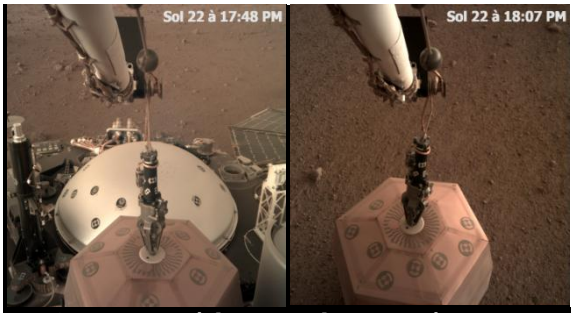


Figure 16 : Déploiement du sismomètre SEIS (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le grappin est désarrimé de son espace de stockage, puis abaissé pour saisir le sismographe SEIS au Sol 18 (15 décembre) à 16h44 PM. Il est de nouveau verrouillé deux jours plus tard le 17 décembre au Sol 20 à 12h39 PM. Le sismographe SEIS est ensuite déplacer et installé à sa position définitive sur le terrain d'expérimentation au Sol 22 le 19 décembre 2018 (Figure 16) entre 17h48 et 18h09 PM, soit 30 minutes avant le coucher du soleil sur Mars. L'appareil est positionné directement devant l'atterrisseur à environ 1,6 mètres de distance, en face du champ de vision de la caméra ICC. La durée de déploiement de l'appareil aura durée environ 22 minutes, et des tests supplémentaires de calibration seront effectués durant les semaines suivantes avant de pouvoir installer le bouclier de protection thermique (WTS). En premier lieu il y eut l'alignement du sismomètre SEIS avec l'horizontale, ensuite il faut recentrés et calibrés les capteurs à très large bande VBB (0,001 et 10 Hz), qui sont resté inactif contrairement aux capteurs de courtes périodes SP (0,1 Hz et 40 Hz). Les données transmises par les six capteurs sismiques seront par la suite

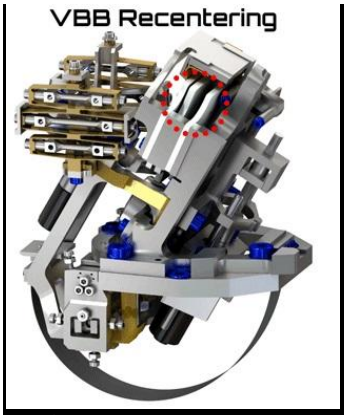


Figure 17 : Capteur VBB (Crédit : IPGP/David Ducros)

utilisées pour caractériser et calibrer le niveau de bruit de fond régnant sur le site. Lorsque le sismomètre est de nouveau mis sous tension au Sol 23 (20 décembre 2018), les capteurs SP ont renvoyés les premières données sismiques jamais obtenues depuis la surface de Mars. Le 22 décembre 2018 (Sol 25), le grappin s'ouvre pour libérer complètement l'instrument. Au cours du Sol 30 (28 décembre 2018), les trois pieds motorisés du système de nivellement se sont activés pour mettre SEIS à l'horizontal, deux pieds se sont rétractés légèrement tandis que le troisième s'est étiré d'environ 5 mm. L'opération de recentrage des pendules VBB est une étape cruciale pour la mise en service du sismomètre SEIS[45]. Le 1er janvier 2019 sur le Sol 35, le moteur d'équilibrage des trois pendules VBB a été activé (Figure 17), le but de l'opération est de placer la partie mobile du capteur dans sa position d'équilibre. Les premières données arrivent dès le Sol suivant et confirme le succès de l'opération, l'appareil est en bon état et près à travailler normalement.

Figure 18 : Déroulement du câble au Sol 37 (caméra ICC) (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le câble (ou ruban plat) qui relie l'instrument à l'atterrisseur InSight, et qui assure l'échange des données ainsi que l'alimentation électrique au spectromètre SEIS, doit-être complètement déroulé pour des raisons de sécurité. Le cordon ombilical reliant SEIS subit d'énormes contrastes de températures entre le jour et la nuit (-70 °C en moyenne), ce qui entraine de forte dilatation thermique qu'elles en deviennent visibles à l'œil, comme le montre les images de la caméra ICC prises entre le Sol 37 à 13h24 et le Sol 38 à 14h09. En plus du facteur de dilatation/contraction thermique, il faut ajouter celui qui est relié au facteur vent pouvant faire balancer et vibrer le câble. Ces deux facteurs participes grandement aux parasitages des mesures lors de leur transmission via le câble entre le sismomètre et l'atterrisseur. Pour des raisons de sécurité, une partie du câble d'alimentation est resté enroulé dans le boitier cylindrique de stockage TSB (Tether Storage Box) fixé sur l'atterrisseur. Après avoir arrêté toutes les activités du spectromètre SEIS le 3 janvier 2019 au Sol 37, la commande fut donnée pour dérouler le reste du câble pour que ce dernier puisse s'étende à plat sur le sol afin d'offrir moins de résistance au vent martien (Figure 18). Au niveau du secteur ou le sismomètre est connecté au câble se trouvent deux plaques métalliques fixées ensemble par un frangibolt (cylindre en alliage à mémoire de forme s'allonge pour fracturer un boulon ou un goujon), forçant le ruban plat à former une boucle de service miniature (Figure 19 A & B). Cette légère torsion du ruban permet de bloquer les perturbations physiques (vibration, dilatation/contraction) qui se propagent le long du câble et qui peuvent parasiter les mesures sismiques. La partie de la boucle de service constituée par les deux plaques porte le nom de LSA (Load Shunt Assembly).

[45] L'installation du premier sismomètre à la surface de Mars par la sonde InSight (partie I)

Figure 19 A : Tentative d'ouverture du LSA Sol 40 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Figure 19 B : Ouverture de LSA (Crédit : NASA/JPL-Caltech/IPGP/Philippe Labrot)

L'étape suivante, qui devait être exécutée au Sol 40 le 6 janvier 2019, consistait à augmenter l'espace séparant les deux plaques métalliques du dispositif LSA en tirant sur le ruban plat de quelques centimètres vers l'arrière (Figure 19 A). Pour ce faire, le grappin doit être fixé en position de stockage afin de dégager et de pouvoir utilisé la petite pelle IDA (scoop) pour tiré sur le ruban plat. Mais des problèmes sont survenus au Sol 38 lors de la mise en position de stockage du grappin, ce qui a retardée l'opération qui devra être remis à plus tard au court de la mission le temps de trouver une solution (d'autres tentatives seront également effectuées jusqu'au Sol 50 le 17 janvier 2019). Deux paramètres importants manquaient de précisions, et qui ne pouvaient pas être totalement prise en compte lors de la programmation des procédures d'excusions de la séquence de capture et de rangement du grappin. Il s'agit des températures très base et de ses variations quotidiennes induisant des contractions et dilatations de matériaux, et de la faible gravité martienne difficile à simuler. Ses deux facteurs peuvent agir sur l'aspect physique du câble du grappin ancré sur le bras robotique d'InSight (rigidité, diamètre, longueur, estimation de la vitesse de lancée, du balancement ou de la retombée du câble). Il s'agit de paramètres très précis, qui sont pourtant difficilement prévisibles lors de la programmation sur Terre de la séquence numérique du déploiement et de l'encrage du câble, estimation du facteur temps et de la météo martienne, avant l'envoi des procédures numériques à l'ordinateur de bord d'InSight sur Mars.

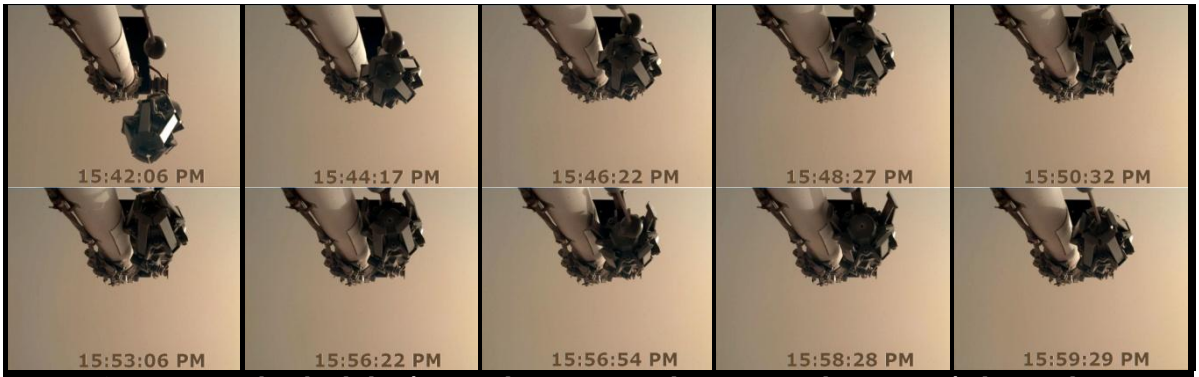


Figure 20 : Recherche de la séquence de capture pour le rangement du grappin résolu au Sol 50 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

La prochaine opération qui n'a pas besoin de l'utilisation du grappin, est l'abaissement du sismomètre SEIS (leveling low) exécuté au Sol 44 (Figure 21). Il s'agit

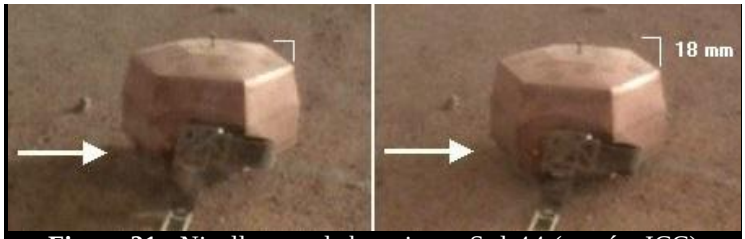


Figure 21 : Nivellement de bas niveau Sol 44 (caméra ICC)

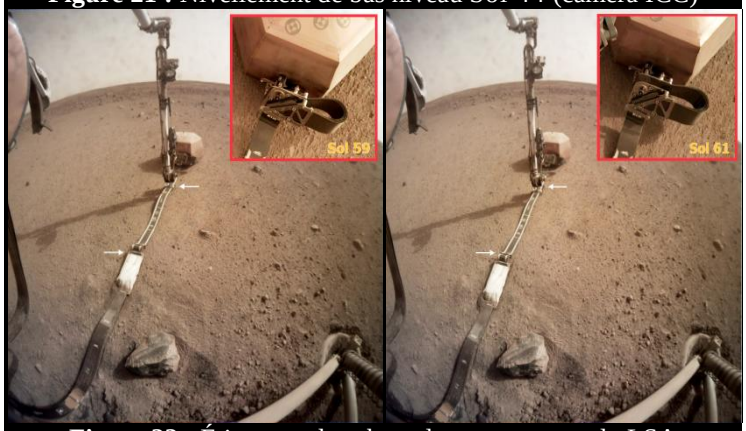


Figure 22 : Étirement du ruban plat et ouverture du LSA (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

d'une étape qui fait suite au nivellement effectué au Sol 30. Cette étape consiste à approcher le spectromètre au plus près du sol en actionner les trois pieds du berceau de mise à niveau de SEIS. Au cours de cette manœuvre, le sismomètre a été abaissé d'une hauteur de 18 mm en six étapes consécutives, chaque pied a été activé l'un après l'autre au cours des cycles de descente. L'objectif était de diminuer la longueur des pieds pour augmenter la rigidité, afin de rendre plus stable le couplage de l'instrument avec la surface martienne pour l'empêcher de trop osciller. L'abaissement du sismomètre répondait également à un second objectif, soit de diminuer sa hauteur par rapport au sol pour y dépose le bouclier de protection thermique et éolien (WTS). Le sismomètre SEIS doit rester isolé des parois intérieur de la coupole du bouclier pour ne pas affecter ou de parasité les mesures. Avec le grappin désormais fixé le long du bras robotique (Figure 20) au cours du Sol 50 (16 janvier 2019). Les activités d'installation et d'étirement du ruban plat du sismomètre SEIS à l'aide du godet ont repris pour écarter les deux plaques métalliques du LSA, qui servent à barrer le passage aux vibrations parasites circulant sur le câble. Après une première tentative de traction qui a échouée sur le Sol 56, le bras robotique tirs de nouveau vers l'arrière sur le ruban plat grâce au godet s'accrochant à la tête d'une pinning mass (épingle à tête massif arrondie) fixée sur le câble au Sol 59. Une troisième tentative sera cependant nécessaire sur le Sol 61 le 27 janvier 2019, pour écartées les plaques du LSA de 2 cm dans la partie haute et de 5 cm pour la partie basse (Figure 22). Au final, après la première tentative de séparation mécanique des deux plaques du LSA au Sol 40, il aura fallu 20 Sols supplémentaires pour écarter le dispositif à un niveau suffisant.

Figure 23 : Placement du bouclier WTS (caméras IDC & ICC) (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

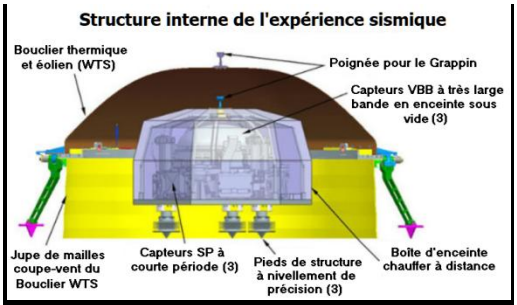


Figure 24 : Distance entre SEIS et WTS
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/IPGP)

Après avoir effectué le nivellement de l'instrument avec l'horizon, le recentrage des capteurs à très large bande VBB, et toutes les étapes nécessaires à l'installation du ruban plat qui relie le sismographe SEIS à la sonde InSight. Il est temps de passer à la dernière étape qui consiste à l'installation définitive du bouclier de protection thermique et éolien (WTS) par-dessus le spectromètre SEIS. Le bouclier d'un poids d'environ 10 kg, est composé d'un dôme blanc en aluminium alvéolaire de 70 centimètres de diamètre équipé de trois pieds rétractables. Le WTS possède également une jupe d'étanchéité extensible composé d'un anneau à cotte de mailles, ayant comme objectif d'épouser le mieux possible les contours accidenter du terrain sur lequel repose le sismographe SEIS. Le but ultime est d'isoler complètement l'appareil de son environnement, en particulier pour le protéger des vents et des variations de températures. La séquence débute au Sol 62 par la seconde libération du grappin de sa position de stockage depuis le début de la mission, ce dernier étant de nouveau opérationnel depuis le Sol 50. Durant l'opération de désarrimage du grappin, quelques particules de poussière ce sont décrochées et ont tombées sur la lentille de la caméra IDC du bras, affectant quelque peut les images de la caméra IDC pour le reste de la mission. Après une longue préparation de teste menée aux Sols 63 et 64, pour faire des mesures plus précises de distance et de positionnement qui seront utilisées lors de la programmation de la séquence numérique qui doit s'effectuer en mode automatique sur Mars. La capture du bouclier de protection thermique (WTS) par le grappin a lieu au Sol 65. Lors de la descente du bouclier WTS sur le spectromètre, réalisé entièrement de manière automatisée le lendemain en milieu de matinée au Sol 66 le samedi 2 février 2019 (Figure 23). Il était très important durant cette étape cruciale que la coupole du bouclier ne touche pas aux parois externes du sismomètre SEIS, tout en respectant un espace de sécurité d'au moins 5 centimètres entre l'instrument et le dôme de protection (Figure 24).

Figure 25 : Déroulement de la jupe extensible du WTS entre les Sols 66 & 67
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Lors du déplacement du bouclier WTS vers le sismomètre, la jupe de mailles ne s'est pas déployée comme prévue. Comprimée sous le bouclier pendant les six mois et demi qu'a durée la phase de croisière dans l'espace à des températures glaciales, puis sur Mars depuis plus de deux mois, la jupe s'est rigidifiée sur elle-même. La gravité martienne étant trois fois plus faible que celle de la Terre, le poids de l'anneau de cotte de mailles qui ceinture le bas de la jupe d'étanchéité n'a pas suffit pour la détende lorsque que le WTS a été soulevé par le bras robotique. La jupe extensible chauffée par le soleil et alourdie par le bandeau de cotte de mailles, commence cependant à se déplier et est complètement déroulé dès le lendemain au Sol 67 (Figure 25). Et trois jours plus tard sur le Sol 70 le 6 février 2019, le grappin est enfin décroché du bouclier WTS. Le spectromètre pourra désormais fonctionner en permanence de jour comme de nuit sans

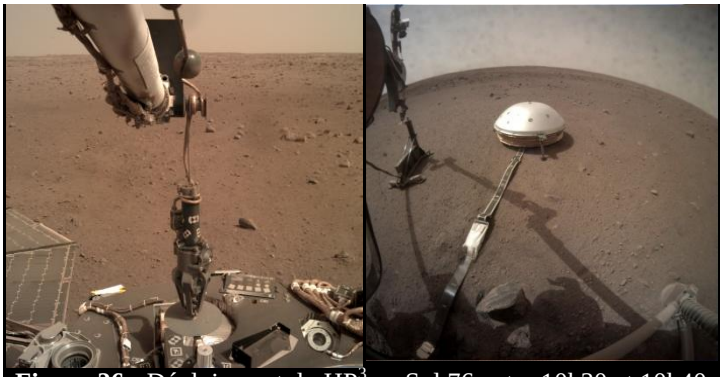


Figure 26 : Déploiement du HP^3 au Sol 76 entre 10h30 et 10h40 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

interruption, et sans avoir besoin d'une pause durant la nuit pour se protéger du grand froid. La campagne scientifique du sismomètre SEIS peut enfin débuter, et plus rien de ce qui bouge sur la planète ne pourra échapper aux capteurs très sensibles de la sonde InSight. Cette étape a mis fin au déploiement du spectromètre SEIS à la surface de Mars, et marque le départ de la prochaine opération qui consiste au déploiement du package du système de capteur de flux thermique HP^3.

Une nouvelle capture de son est enregistré au Sol 74. Les préparatifs pour le déploiement du package de flux de chaleur et de propriétés physiques (HP³), du centre aérospatial allemand (DLR), sont effectuées entre les Sols 73 et 75 (du 9 au 11 février 2019). La température mesurée la plus élevée durant le Sol 75 à été de -9,44 °C durant le jour, et de -95,44 °C pour la plus basse mesurée durant la nuit. L'appareil HP³ est déplacé dès le lendemain pour être positionné dans son espace de travail à environ un mètre du sismomètre SEIS, et d'environ 1,6 mètres de distance de l'atterrisseur InSight au Sol 76 vers 10h40 LMST (heure locale de Mars) le 12 février 2019 (Figure 26). Le mécanisme de compensation thermique (TCDM) des pendules VBB du spectromètre SEIS, dispositif conçu pour minimiser les variations de température résiduelles auxquelles sont exposés les capteurs dans leur enceinte sous vide, a été réglé au cours des Sols 77 et 81. Le premier réglage d'orientation des TCDM est effectué au Sol 77, puis après analyse des données recueillis des ajustements supplémentaires ont été fait au cours du Sol 81. D'autres phases de calibration de température et du taux de vibration des pendules VBB du sismomètre SEIS seront fait aux Sols 85 et 93, faisant passer l'appareil du mode d'analyse ingénierie (haut gain) au mode d'analyse scientifique beaucoup plus sensible à la détection des vibrations sismique. La phase de mise en service de SEIS qui s'est étalée sur une durée de 71 Sols, a permis de tester avec succès tous les sous-systèmes de l'instrument. Le démarrage de la campagne scientifique de sismomètre SEIS va débuter officiellement à partir du 5 avril 2019 et elle couvrira une année martienne (2 ans). Tout est désormais en place pour que la station géophysique InSight puisse détecter les premiers séismes martiens, et de dévoiler ainsi la structure interne de Mars.

Après le déploiement réussit du package de flux de chaleur et de propriétés physiques (HP³) au Sol 76[46], et avoir effectué différents inspection aux Sols 79, 81 et 83. La taupe est finalement libérée du verrou de lancement qui l'ancrait à l'intérieur du tube vertical du système HP^3 au Sol 87 (Figure 27). Le 1er mars 2019 sur le Sol 92, la taupe creuse pour la première fois dans le sol martien sur une profondeur de test initialement prévue de 70 cm en 4 heures. Mais

[46] The InSight mission logbook (Tilman Spohn) (DLR)

Figure 27 : Sol 85
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

malheureusement, cette première séance de test de martelage a été stoppée assez rapidement après avoir creusé sur 24,5 cm de profondeur en 4 min 52 secs, avec une inclinaison de la taupe à 16°. La séance de martelage a provoqué un léger déplacement de la structure de support HP^3 vers l'arrière d'environ 2 cm, et la détection de se mouvement a déclenché l'abandon du test. La profondeur n'est pas suffisante pour faire la première mesure de chaleur, les mesures doivent être échelonnées sur un intervalle de 50 cm de profondeur pour être efficace dans l'interprétation du flux thermique dégagé par le sous sol de Mars. Entre chaque séance de martelage, la taupe doit être mise au repos durant quelques jours pour refroidir, afin d'éliminer le surplus de chaleur générée par la friction lors du martelage. Un deuxième essai est programmé deux jours plus tard sur le Sol 94 le 3 mars 2019 sur la même profondeur avec une durée de martelage de 5 heures, mais toujours sans résultats (Figure 28). La dernière séance de martelage a également provoqué un léger déplacement de la structure de support HP^3 vers la gauche sur quelques cm. La communication des données est relayée par l'orbiteur ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO) de l'agence spatial Européenne (ESA) et par Mars Odyssey de la NASA. Il est probable qu'une roche ou une couche de gravier l'empêche de progresser dans le sous-sol, mais étant donné le changement d'inclinaison par rapport à la verticale (lié à la résistance rencontrée), il est également possible que le pénétrateur soit désormais mécaniquement bloqué dans son tube de support.

Figure 28 : Sol 94 (caméra ICC)
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Parallèlement aux dernières phases des opérations de calibration, le sismomètre SEIS s'est également mis à l'écoute des vibrations générées par l'enfoncement de la taupe du capteur de flux thermique HP^3 dans le sous-sol martien au cours des Sols 92 et 94. Les données collectées montres que les capteurs à courte période (SP) du sismomètre SEIS, bien adaptés aux mesures à hautes fréquences, a enregistrer des informations sur les opérations de pénétration et sur le fonctionnement interne de la taupe. Quant aux capteurs VBB, les signaux sont tellement forts lorsque la taupe martel le sol que ces derniers en devient saturés. Pour tenter de discerner ce qui a immobilisée la taupe dans son parcours, une troisième série de courte séquence de pénétration d'une durée de 10 à 15 minutes vont être programmée plus tard au court de la mission. Pour l'instant, l'équipe en charge de l'instrument HP^3 a décidée de suspendre les travaux pour deux semaines, afin d'analysée la situation de plus près et de proposer des stratégies pour surmonter l'obstacle. En se basant sur le temps écoulé entre les coups de marteau de la taupe, les scientifiques pourraient peut-être apprendre quelque chose de nouveau sur ce qui empêche la sonde de creuser plus loin sous terre, et de les appliquer lors des prochaines séances de martelages de diagnostique qui sont prévus plus tard au court de la mission (Sol 118 le 28 mars et Sol 158 le 8 mai). Un filtre numérique spécifique va être chargé sur le boitier électronique de commande du sismomètre SEIS pour augmenter la résolution temporelle. Selon le délai et la force de ce que les capteurs SP entendront, il sera alors possible de savoir si la taupe continue d'avancer ou si elle ne cesse de rebondir contre un obstacle, ou encore si elle est totalement bloquée. Un second filtre numérique sera également activé sur le sismomètre SEIS, pour

empêcher la saturation des capteurs ultra-sensibles VBB durant les opérations de pilonnage du système HP^3. Grâce à l'étude de la différence de propagation des ondes sismiques selon les matériaux, il sera peut-être possible d'identifier la présence d'une couche indurée (plus résistante) à environ 30 centimètres de profondeur. D'autres tests ont eut lieu sur Terre lors de l'arrivée d'une réplique de l'instrument HP^3, qui a été expédiée au Jet Propulsion Laboratory de la NASA à Pasadena en Californie. Les ingénieurs vont l'utiliser pour analyser plus en détail comment le bras robotique d'InSight pourrait être utilisé pour soulever ou déplacer la structure de support de la taupe pendant qu'elle creuse.

L'orbiteur Trace Gas Orbiter (TGO) du programme ExoMars de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), a réussi à photographier la sonde InSight à la surface de la planète rouge depuis l'orbite martienne à l'aide de sa caméra CaSSIS le 2 mars 2019 (Sol 93). C'est la première fois qu'un satellite européen réalise une telle prouesse technique, qui nécessite une caméra très performante et des conditions particulières de prises d'image, vue de la taille relativement réduite de l'engin situé à la surface de la planète Mars. Outre le rôle de relais de télécommunication, l'orbiteur TGO en support à InSight à pour tache de photographier à intervalles réguliers les régions situées tout autour du site d'atterrissage dans le but d'identifier tout nouvel impact météoritique. Ce travail de reconnaissance de terrain avait déjà été entamé en préparation de l'arrivée d'InSight par Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) en effectuant le quadrillage d'une région d'environ 5000 km^2 autour du site d'atterrissage. La cartographie effectuée par les orbiteurs servira de référence pour aider à l'identification de nouveaux impacts sur Mars. Pour déterminer la structure interne de Mars, le sismomètre SEIS peut s'appuyer sur deux sources sismiques : les tremblements provoqués par des ruptures brutales de matériaux rocheux au niveau de la croûte ou du manteau martien, ou des ondes de choc libérées par l'impact de météorites en surface. La capacité de localiser précisément l'épicentre d'un séisme associé à un impact aidera à l'interprétation des données enregistrées par SEIS.

Le grappin est de nouveaux mis pour la deuxième fois en position de stockage sur le bras robotique IDA au Sol 95 le 4 mars 2019. Entre temps, l'équipe du système HP^3 réalise pour la première fois des mesures de conductivité thermique sur Mars en faisant l'observation du passage de l'ombre des éclipses du satellite Phobos, qui a traversée le champ de vision du radiomètre aux Sols 96, 97 et 99 (5, 6 et 8 mars 2019). Les mesures indiquent un refroidissement d'environ 1 °C lors du passage de l'ombre en 30 secondes, il s'agit de la première éclipse sur Mars observée avec un radiomètre. Le 9 mars 2019 marque également un autre grand exploit pour la mission, il s'agit du centième Sol de la sonde InSight sur la planète Mars, L'hiver martien dans l'hémisphère nord de la planète Mars va bientôt céder sa place au retour du printemps, dont l'équinoxe est prévue pour le 24 mars 2019 (Sol 115). La température mesurée la plus élevé durant le Sol 104 le 13 mars 2019 a été de -14,44 °C le jour et de -96,11 °C pour la plus basse température mesurée durant la nuit. Deux mesures de conductivité thermique TEM-A (capteurs de la taupe) effectuées sur les Sols 97 et 116, ont révélé qu'une partie de la taupe était au-dessus du sol et soumise à des fluctuations de température diurnes. Deux jours plus tard, la troisième séance de martelage effectué au Sol 118 le 28 mars 2019 est une réussite, et pour se premier test de diagnostique seulement 197 coups de marteau ont été programmé sur une durée de 12,5 minutes. Cette séance de teste et de diagnostique a été appuyé et suivit par la prise de plusieurs images des caméras IDC et ICC, et par les capteurs sismiques d'InSight équipé des nouveaux filtres numérique pour aider à diagnostiquer la situation d'anomalie de l'instrument HP^3. Les images ont été assemblées pour produire une courte séquence vidéo qui montre un déplacement léger de la structure de support de

l'appareil HP^3, qui a tangué sur place et qui s'est soulever au moment ou la taupe martelait le sol.

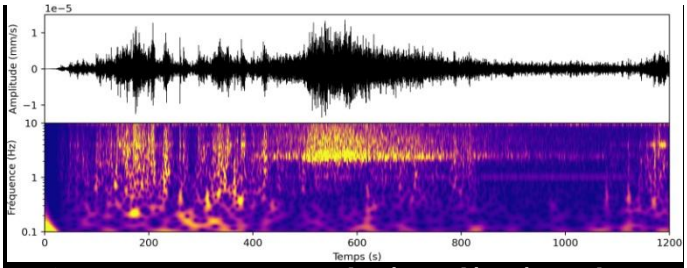


Figure 29 : Spectrogramme du séisme détecté au Sol 128 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/IPGP)

Le 6 avril 2019 sur le Sol 128 vers 15h30 (LMST: heure locale de Mars), un petit signal sismique est enfin détecté et enregistré pour la première fois dans l'histoire de l'exploration de la planète Mars par les capteurs SP du sismomètre français SEIS (Figure 29). L'événement sismique situé dans les hautes fréquences (HF) est cependant trop petit, et les signaux n'ont pas permis d'obtenir une localisation pour fournir des données utiles sur l'intérieur de Mars. Il s'agit d'un bruit de fond de très faible amplitude de 2,1 qui ne semblait pas avoir été provoqués par le vent ou d'autres sources de bruit indésirables, mais qui donne enfin la preuve que Mars est toujours sismiquement active. Les caractéristiques du signal tendent à montrer que Mars est comme la Lune, et possède des structures qui diffractent fortement les ondes sismiques (blocs de forme alvéolaire de densité variable). Bien que Mars ne possède pas de plaques tectoniques, responsables de la plupart des séismes terrestres, les planètes et la Lune subissent le type de séismes provoqués par des failles ou des fractures de leur croûte. À mesure que les masses lourdes et le refroidissement lent ajoutent du stress à la croûte, celle-ci se fissure en libérant de l'énergie. La planète Mars est ainsi le troisième corps planétaire rocheux du système solaire étudié par les sismologues, soit 130 ans après les débuts de la sismologie instrumentale sur Terre, et 50 ans après le premier sismomètre déployé sur la Lune par Apollo 11 en juillet 1969. Pour rappel, la première mesure effectuée par un sismographe terrestre a été fait en début de soirée le 17 avril 1889 à Potsdam en Allemagne par Ernst von Rebeur-Paschwitz.

Le Sol 145 le 25 avril 2019 est une journée un peut spéciale sur Mars, elle débute très top le matin à 05h35 AM par la prise d'une série d'image du Soleil levant à l'aide de la caméra IDC du bras robotique (Figure 30 A). Le Soleil sur Mars n'apparaît qu'environ au deux tiers de sa taille vu depuis la Terre. Puis, une nouvelle série d'image est prise en fin de journée à 18h26 PM avec la caméra IDC du bras robotique, pour nous dévoilé une magnifique vue sur le couché de Soleil sur Mars (Figure 30 B). Cette expérience sera reproduite plus tard au court de la mission au Sol 1198 le 10 avril 2022. Toujours sur le Sol 145, la caméra contextuelle d'instrument ICC située sous le pont de l'atterrisseur a capturé une nouvelle série d'images, qui montre cette fois-ci des nuages dérivant dans le ciel martien juste après le coucher du soleil entre 18:31 et 19h01 PM heure locale de Mars (LMST). Une version aux couleurs corrigées montre plus précisément les images telles que les verraient l'œil humain (Figure 30 C). La première mission à renvoyer de telles images fut l'atterrisseur Viking 1 qui captura un coucher de soleil le 21 août 1976 (Sol 32 de sa mission), et Viking 2 qui a capturé un lever de soleil le 14 juin 1978 (au Sol 633).

Le deuxième teste de martelage de diagnostique est programmé pour le Sol 158 le 8 mai 2019, avec une séquence de martelage de 198 couts de marteau exécuté en 12,5 minutes. L'appareil HP^3 à bien tanguer avec de légers soulèvements verticaux à chaque coups de marteau de la taupe, mais les résultats n'ont malheureusement pas été concluants. L'analyse des images ICC démontre que la taupe est au quart de sa longueur dans le tube du système de flux de chaleur HP^3. Les résultats des deux tests de diagnostique ne permette pas encore de conclure pour choisir l'une des trois options suivante : 1) l'accrochage de la taupe ou de l'attache dans la structure de

Figure 30 A : Levé de Soleil au Sol 145 à 05h35 AM (caméra IDC)

Figure 30 B : Couché de Soleil au Sol 145 à 18:31 PM (caméra IDC)

Figure 30 C : Nuage dérivant dans le ciel dans la soirée du Sol 145 (caméra ICC) (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

support de l’appareil du capteur de flux thermique HP^3, 2) bloquée par une roche suffisamment grande d’environ 30 cm, et 3) une friction insuffisante par les parois du trou de forage sur la coque de la taupe. La taupe est conçue de manière à ce que de la terre meuble (régolithe) s'écoule autour d'elle, ajoutant une friction et une résistance qui s'oppose à son recul, lui permettant ainsi de creuser plus profondément dans le sol. Sans suffisamment de friction et d’adhérence, la taupe rebondira sur place par manque de résistance sur les parois du trou creusé.

L'analyse des données sismiques recueillis lors des dernières séances de martelage de diagnostique effectuées sur les Sols 118 et 158, ont permis de donnée une valeur moyenne calculée sur l'intervalle de temps entre le premier et le second coup de marteau compris entre 70 à 80 ms. Cette valeur est située à la limite supérieure qui indique que la taupe rebondit librement sur un obstacle (50 ms), mais elle est cependant encore plus près de la limite qui indique que la taupe progressant normalement (100 ms). L'interprétation qui a été donnée à l’époque pour expliquer ses résultats (l’hypothèse n° 3), était que la taupe n’avait pas suffisamment de force de frottement entre la coque de la taupe et le régolithe tapissant les parois du trou de forage, qui a été

rebaptisé pour l'occasion « la fosse », pour offrir une résistance adéquate et suffisante pour la faire progressée substantiellement. Pour aider à éclaircir ce dilemme avec la taupe, la décision de levée le package de flux de chaleur HP³ est prise pour voir en dessous, pour vérifier la situation du positionnement de la taupe et de son câble d'attache (Science Tether). Par conséquent, le levage de l'appareil va s'effectuer en plusieurs étapes incluant un examen minutieux pour chacune d'entre elle en cours de route.

Le sismomètre SEIS est soumis à tout instant à des sources de bruits divers et variés qui viennent parasiter les signaux sismiques et obscurcir les infimes tremblements de la surface. Parmi ces perturbations, certaines émanent de la sonde quand le bras robotique est actionné pour acquérir des images, ou lorsque des courants électriques circulent dans les panneaux solaires. D'autres prennent naissance au cœur même de l'instrument, au sein des délicats composants électroniques, ou lorsque les structures mécaniques se déforment sous l'effet du stress thermique. Mais l'élément perturbateur principal reste l'environnement martien lui-même. Les variations de températures et les vents aveuglent le sismomètre SEIS. Cependant, il existe un intervalle entre 17h00 et minuit ou la planète devient beaucoup plus calme et que la plupart des phénomènes parasites disparaissent, SEIS bénéficie alors de conditions exceptionnelles pour écouter l'activité sismique de Mars. Durant cette période, le niveau de bruit s'effondre d'un facteur 100 pour atteindre une valeur comprise entre 500 et 1000 fois inférieure que celle de la Terre.

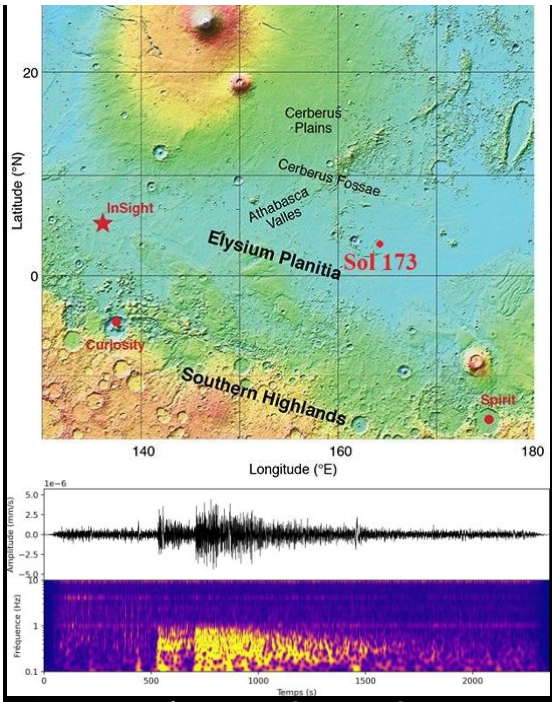


Figure 31 : Séisme au Sol 173, Cerberus Fossae (Crédit : MOLA Science Team & IPGP)

Le deuxième signal sismique d'importance a été détecté aux petites heures du matin sur le Sol 173 le 23 mai 2019 à 02h55 (LMST: heure locale de Mars), et que l'on pense être un tremblement de terre de magnitude 3,7 (Figure 31). L'événement sismique qui a eut lieu au sol 173 a permis de faire la première identification entre les ondes de volume P et S qui se déplace en profondeur sur Mars, et a également permis de faire la première localisation précise de l'épicentre. Il existe deux familles d'ondes sismiques (Figure 31:c), il y a les ondes sismiques de volumes (profondeur) et les ondes sismiques de surface. Les ondes sismique de volume se propagent en profondeur et sont divisées en deux types (P et S). Il y a les ondes de type P ou primaires (de compression), plus rapide elles se propagent entre 6 et 14 kilomètres par seconde et arrivent en premier sur les sismomètres. Les ondes P traverses tout les types de matériaux, qu'il soit solide ou liquide, et plus le milieu est dense plus leur vitesse de propagation s'accélère. Au contraire, plus la densité diminue en remontant plus près de la surface et plus la vitesse de propagation ralentis. Le second type d'onde de volume est représenté par les ondes de type S ou secondaires (de cisaillement), plus lente elles voyagent toujours derrière les ondes P entre 4 et 6 kilomètres par seconde, et elles détestent les liquides qu'elles ne traversent pas. Lorsqu'un matériau rocheux voit arriver un front d'onde P, il subit une déformation physique de type compression/extension et les particules se déplacent selon un mouvement avant-arrière dans la direction de la propagation de l'onde, puis

retrouve aussitôt sa forme initiale après le passage de l'onde. Au contraire, les ondes de type S provoquent des contraintes de cisaillements perpendiculairement à la direction dans laquelle l'onde de volume P se propage. Les ondes de type S résulte d'une force de rétroaction de recherche d'équilibre, qui entre en résonance lors de la décompression suite à la dilatation des sols après le relâchement de la pression causé par le passage de l'onde de compression primaire (P).

La seconde grande famille des ondes sismiques, qui résultent de l'interaction des ondes de volume, est celle des ondes dites de surface, les particules oscillent alors dans un plan vertical par rapport à la direction de propagation de l'onde, et elles sont également divisées en deux types. Les ondes de Rayleigh (R) aux déplacements plus complexe assimilables à une vague, et les ondes de Love (L) qui ressemble aux ondes S, mais qui impriment un mouvement de vibration latéral du sol (oscillant dans un plan horizontal) qui se propage à 4 km/s à l'origine de nombreux dégâts. Les ondes de surfaces sont des ondes guidées par la surface d'une planète, semblable aux rides formées à la surface d'un lac. Les ondes sismiques de surfaces peuvent occasionner des dégâts très importants sur leur passage, et elles sont responsables des destructions massives qui surviennent lors des séismes les plus violents (ondes de Love). Le sismomètre SEIS d'InSight embarque un sismomètre à très large bande (ondes longues) sensible aux ondes de longue période ou basse fréquence (VBB), qui est couplé à un second sismomètre à courte période ou haute fréquence (SP) qui étend les capacités d'écoute dans le domaine des ondes courtes (Figure 31:b). Les séismes martiens ont été classés en deux populations principales : les séismes de basse fréquence LF (détecté par les capteurs VBB) avec une énergie située majoritairement sous 1 Hz, c'est-à-dire une vibration par seconde, et les séismes de haute fréquence HF avec une énergétique supérieur à 1 Hz (détecté par les capteurs SP).

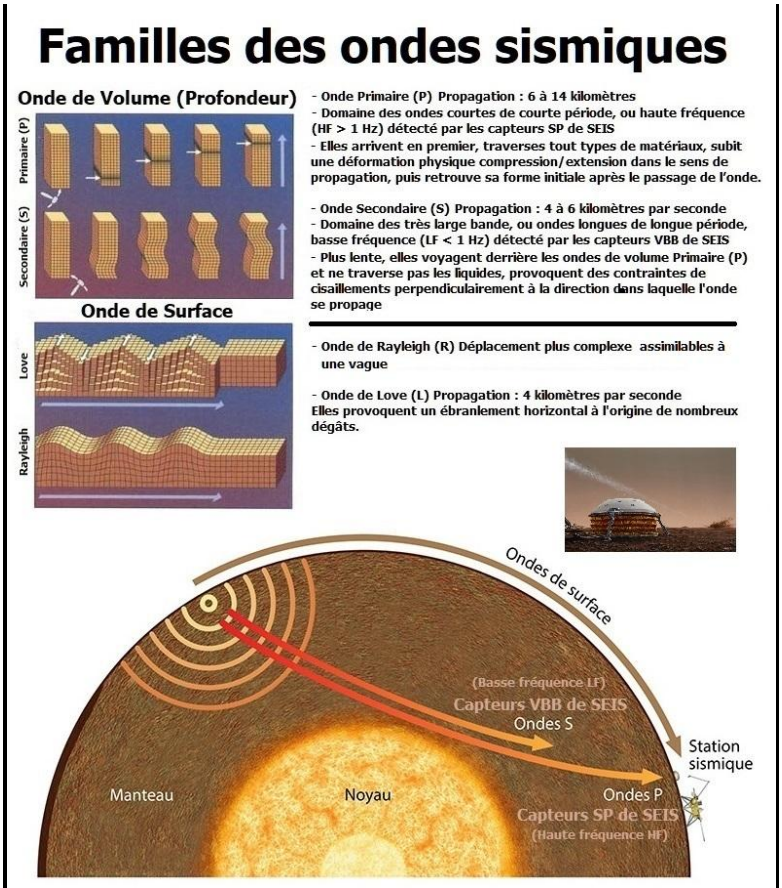


Figure 31 C : Familles des ondes sismiques
(Crédit : USGS science for a changing world : Earthquake Hazards Program (pour la figure en haut à gauche) & IPGP/David Ducros)

Contrairement à l'événement qui est survenue au Sol 128, la secousse sismique du Sol 173 était beaucoup plus forte, et elle appartenait à la population des séismes de basses fréquences (VBB). Bien que la vitesse à laquelle les ondes sismiques se déplacent dans les couches profondes de Mars ne soit pas encore connue avec précision, le sol s'est mis à trembler à 1 600

Figure 32 : Séquence du déplacement de l'appareil HP^3 (images de la caméra ICC)
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

kilomètres à l'est de la station InSight à partir d'une région baptisée Cerberus Fossae (Figure 31). Il s'agit de la première zone sismique active découverte sur la planète Mars. Cerberus Fossae est un immense système de failles situé au nord-est de la plaine d'Elysium (Elysium Planitia) où est stationné InSight, et qui s'est probablement formé lors de la mise en place d'Elysium Mons situé à plus de 1 000 km à l'ouest. Il s'agit du second complexe volcanique de Mars en termes de taille après le dôme de Tharsis et de son volcan géant Olympus Mons[47], qui fait plus de 21 kilomètres de haut (soit 2,5 fois plus haut que le mont Everest sur Terre) avec une base plus grande que l'État du Colorado. Le champ de failles et de fractures de Cerberus Fossae à apparemment accumulé dans son histoire des nombreuses contraintes, dont certaines ne sont pas encore relâchées. L'étude de cette région depuis l'orbite martienne a permis de dénombrer de nombreuses chutes de pierre le long des versants abrupts des failles, et la déstabilisation des pentes pourraient être due à des secousses sismiques. Un second séisme de basse fréquence (la troisième détection) a été détecté dix jours plus tard en début de soirée au Sol 183 le 3 juin 2019 à 19h53 (LMST). Il est localisé approximativement et son épicentre serait situé à proximité d'une énigmatique structure elliptique, cratère d'impact ou ancien volcan, appelée Orcus Patera. Le sismomètre SEIS de InSight détecte environ deux tremblements de terre par jour.

La séquence de préparation pour le déplacement de la structure de support du package du flux de chaleur HP^3 débute avec le désarrimage du grappin, qui est libéré de son espace de stockage pour la troisième fois depuis le début de la mission au Sol 182 le 1er juin 2019. L'appareil doit être levé très doucement avec précaution, pour vérifier que la taupe ou l'attache qui la relis à l'intérieur du tube du package HP^3 n'est pas accrochées dans l'appareil, et qu'il se déroule bien lors de la levée sans faire sortir la taupe du sol. La première élévation du package HP^3 est effectué sur le Sol 203 le 23 juin 2019 en début de l'après midi sur une hauteur de 12 cm (Figure 32), afin de dégager suffisamment la taupe de l'appareil pour vérifier l'état de la fosse. Le retrait de la structure a permis de mieux voir la fosse qui s'est formé autour de la taupe lors de ses séances de martelage, et les images suggèrent que la taupe s'est enfoncée d'environ 30 cm dans le sol martien. Le diamètre de la fosse (environ 6 cm) est presque le double de celui de la taupe (2,7 cm), et par manque d'adhésion pour creuser plus profondément la hauteur de la taupe au-dessus du régolithe est de 7 cm. La taupe a racontée une couche plus résistante (duricrust) sur environ 10 cm de profondeur, ce qui lui a fournis assez de friction au début pour creusé la fosse, mais plus bas la consistance du sol semble plus poreux et moins dense n'offrant que peut de résistance.

[47] SEIS sur Mars: un état des lieux suite à la publication des premiers résultats, 18 février 2020

Figure 33 : Repositionnement Sols 161 et 209
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

La deuxième étape est exécutée sur le Sol 206 en début de l'après midi pour une élévation additionnelle de 13 cm. Avec une hauteur totale de 25 cm, le ruban d'alimentation et de transfère des données qui relis la taupe au boitier d'attache (Science Tether) peut être étiré et dérouler, cette manœuvre à pour objectif de préparer le déplacement de l'appareil vers l'arrière (Figure 32 et 33). La troisième étape est effectué sur le Sol 209 le 29 juin 2019 en début de l'après midi, avec une élévation supplémentaire de 29 cm pour atteindre une hauteur maximal de 54 cm, puis l'appareil est placé à environ 35 cm en arrière de la taupe en direction de l'atterrisseur. Le largage du grappin est effectué deux semaines plus tard sur le Sol 223 le 13 juillet 2019 en milieu de l'après midi, et il est placé dans son espace de rangement quatre jours plus tard sur le Sol 227 le 18 juillet 2019. Afin de mieux comprendre l'anomalie de pénétration de la taupe dans le régolithe martien, les environs de la fosse est examiné plus attentivement à l'aide du bras robotique IDA, et par des images de la caméra IDC prises sous différents angles et à différentes heures entre les Sols 220 et 234 (du 11 au 25 juillet 2019). Après examen, le plan est d'exercé une certaine pression sur le sol avec le fond plat de la pelle IDA, afin de faire effondrer une partie des parois de la fosse sur la taupe pour lui donner une pression et une résistance additionnelle, qui pourrait l'aider a avoir plus d'adhérence et de friction pour lui permette de creusé plus profondément dans le sol.

Pendant que la caméra IDC du bras robotique examine la fosse ou se trouve la taupe, un quatrième séisme majeur de magnitude de 3,3 est mis en évidence par les capteurs VBB du sismomètre SEIS en début de soirée au cours du Sol 235 à 19h30 (26 juillet 2019). L'épicentre est localisé à environ 1 535 km dans une région situé plus au nord de Cerberus Fossae dans le secteur de Grjota Valles et de Tartanus Montes. Les épicentres des séismes enregistrés aux Sols 173 et 235 sont séparés d'environ 450 kilomètres. Classé parmi les séismes de basse fréquence (LF) avec une magnitude de 3,3, l'événement du Sol 235 fut accompagné d'une réplique 35 minutes après le séisme principal. Il s'agit de la première réplique jamais détectée à la surface de la planète Mars. La très grande majorité des séismes martiens ne sont pas localisés avec précisions, et seule la distance par rapport à InSight peut être déterminée, ainsi les plus lointains seraient situés à une distance comprise entre 3 000 et 4 000 kilomètres. Cette activité sismique résulterait de la réactivation de failles et fractures très anciennes (Cerberus Fossae, Grjoa Valles), situés à la limite de la dichotomie martienne subissant une profonde fracturation compressive des basses terres martiennes, et elles seraient déclenchées par la contraction thermique de la planète. Les tremblements de terre observés sur Mars suggèrent que la croûte martienne est comme un mélange de la croûte terrestre et de celle de la Lune. Les fissures de la croûte terrestre sont scellées avec le temps à mesure que l'eau les remplit de minéraux. Cela permet aux ondes sonores de se propager en ligne droite sans interruption et de traverser d'anciennes fractures. Les croûtes plus sèches comme celle de la Lune restent fracturées après les impacts, et au lieu de se déplacer en ligne droite les ondes sonores sont diffusées et ralentis en cherchant à contourner les obstacles.

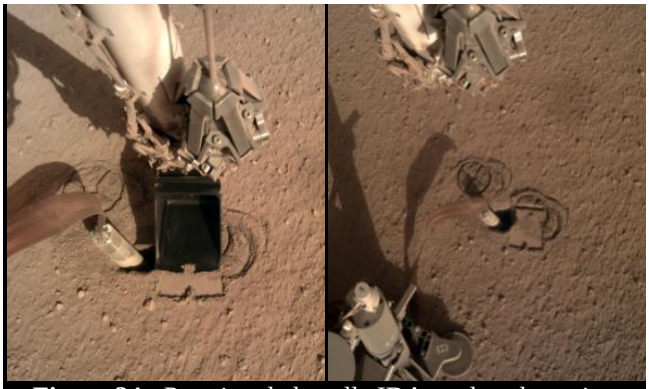


Figure 34 : Pression de la pelle IDA sur le sol martien (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Entre les Sol 234 et 240, le dos du fond plat de la pelle IDA est descendus et rapprochée très doucement au plus près, puis déposé sur le sol pour toucher le régolithe du côté Est de la fosse et de la taupe (Figure 34). Le but de cette manœuvre est de préparer la pelle IDA a exécuté deux types d'interactions qui seront exécuté entre les Sols 240 et 253 du 1er au 13 août 2019 (Regolith Interaction 1). La première séquence d'interaction consiste à utiliser le fond plat de la pelle IDA pour l'enfoncer dans le sol (Sols 240 et 253). Et le deuxième type d'interaction consiste à faire un mouvement de hachage vertical pour affaiblir le sol, en utilisant les pointes métalliques plates et tranchante situées devant la lame de fond de la pelle IDA pointée perpendiculairement à la surface du sol (Sols 243, 250 et 253). En compactant et ensuite en affaiblissant la surface du sol avec le mouvement de hachage, cette interaction pouvait aider à faire écrouler une partie des parois de la fosse (Figure 35) et ainsi de donner une plus forte adhérence à la taupe pour l'aider à creusé plus profondément. Les tentatives de hachage et de poussée n'ont cependant pas entraîné de changement significatif dans la couche superficielle compactée de la fosse. La température mesurée la plus élevé durant le Sol 261 a été de -26,67 °C le jour et de -102,22 °C pour la plus basse température mesurée durant la nuit.

Figure 35 : Test de remplissage de la fosse au Sol 243, 250 et 253 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Membre du forum UMSF)

L'atterrisseur InSight se prépare ensuite à passer à travers sa première conjonction solaire, quand Mars et la Terre se trouves alignés sur les côtés opposés du Soleil, entre les Sols 267 et 279 du 28 août au 10 septembre 2019. Et pour ce faire, une liste d'activité réduite est programmée pour être exécuté en mode automatique durant la conjonction solaire. Le Soleil expulse du gaz chaud et ionisé de sa couronne qui s'étend loin dans l'espace, ce gaz peut interférer avec les signaux radio lors des communications entre les vaisseaux spatiaux sur Mars et la Terre. Une influence imprévisible pouvant corrompt les signaux et de modifier les commandes envoyées tout en entraînant des comportements inattendu de la part de vaisseaux spatiales dans l'espace lointain. Pour être sûr de ne pas subir d'interférences radio et de provoquer des pertes inutiles, les communications sont interrompues quand Mars disparaît suffisamment derrière la couronne solaire. Le cinquième séisme d'ampleur est enregistré par le sismomètre SEIS en fin de soirée au Sol 290 à 22h08 le 21 septembre 2019, il s'agit d'un enregistrement de catégorie B sans polarité de localisation. Depuis sa mise en service, le sismomètre SEIS a enregistré une centaine d'événements jusqu'ici, dont une bonne vingtaine a été interprété comme des séismes sur Mars.

Figure 36 : Positionnement de la pelle au Sol 302 **Figure 37 :** Petit espoir entre les Sols 311 et 318 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Les tentatives d'effondrement de la fosse ayant échouées, une nouvelle stratégie a été développée au Sol 302 le 3 octobre 2019, qui consiste à positionner la pelle en appuis sur le côté droit de la coque de la taupe à 3 cm au-dessus de la surface du régolithe (Figure 36), puis d'appliquer une force sur la taupe avec le bras en l'abaissant verticalement sur la coque de la taupe (épingler la taupe)[48]. Les forces combinées entre l'appui du bras robotique IDA et le martelage de la taupe, pourrait donner une plus grande force de friction et d'adhésion au régolithe contre les parois de la taupe. Cette manœuvre de teste d'une durée de deux semaines appelée "Pinning" (épingler) est exécuté entre les Sols 291 et 305 (du 22 septembre au 6 octobre 2019). Certains mouvements de rotation de la taupe sur elle-même sont observés durant les séances de martelages, mais la taupe ne s'enfonce pas plus profondément dans le sol. Le solstice d'été arrive le 8 octobre 2019 sur le Sol 307, et à l'inverse de l'hémisphère Sud, la saison des tempêtes de poussières ne débute qu'à la fin de l'automne pour ce poursuivre jusqu'au début de l'hiver dans l'hémisphère Nord de la planète Mars. Les saisons étant inversées d'un hémisphère à l'autre. Le lendemain suite à une petite séquence de martelage de vingt coups de marteau qui a fait glisser la pelle IDA vers le haut, un petit mouvement de la taupe vers le bas d'environ 5 mm a été observé.

A partir du Sol 311 le 12 octobre, la première phase du mode Pinning (Sols 311 à 318) commence véritablement avec le bras IDA placé plus bas de 5 mm pour venir s'appuyer de nouveau contre la surface inclinée de la taupe (ré-épinglage). Suite à ce repositionnement, 101 coups de marteau ont été commandés qui a aussitôt entraîné un mouvement vers le bas de la taupe d'environ 1 cm, démontrant ainsi qu'il n'avait pas de pierre qui faisait obstacle à cette profondeur. Deux autres séances de martelages sont effectuées sur les Sols 315 et 318, qui ont également provoquée un nouveau mouvement descendant d'environ 1 cm avec 101 et 152 coups de marteau. Sur le Sol 318 le 19 octobre 2019, la pelle IDA c'est rapproché dangereusement du capuchon arrière de la taupe, et continuer à l'épingler n'est plus considéré comme sûr. La taupe s'est enfoncée de 5 cm supplémentaire dans le régolithe martien en utilisant la technique d'épinglage depuis le Sol 308 (Figure 37). Mais cette méthode à donc un petit défaut, c'est que chaque séance de martelage entraine une petite rotation de la taupe autour de son axe, qui fait tourner le plan d'attache du ruban Science Tether qui sort du haut du capuchon arrière de la taupe pour la reliée à l'appareil de support HP^3. Le mouvement de torsion et la friction avec les rebords de la pelle IDA, qui peut toujours glisser sur la coque, pourrait potentiellement endommager l'attache du câble scientifique de la taupe vue que celle-ci est déjà rendue au raz du sol (Sol 318). Et le deuxième petit défaut concerne l'inclinaison de la taupe combinée avec le mouvement

[48] The InSight HP3 Penetrator (Mole) on Mars: Soil Properties Derived from the Penetration Attempts and Related Activities, December 9, 2022

d'oscillation lors du martelage, qui entraine un élargissement de la fosse situé du côté opposé de l'appui avec la pelle IDA. Il fallait donc changer de tactique pour éviter un bris de matériel inutiles.

Figure 38 : Catastrophe au Sol 325 (Reversal 1) (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Une nouvelle méthode de forage est élaborée, qui consiste à appuyer la pelle IDA directement contre le sol pour transférer une certaine force verticale à la taupe à travers la surface du régolithe, évitant ainsi tout contact direct avec la taupe. La nouvelle méthode est appliquée à partir du Sol 322 le 23 octobre 2019 en exécutant une séance de martelage de 50 coups de marteau, avec cette fois-ci une vitesse de pénétration moyenne dans le régolithe de 0,1 millimètre par coup. Le bras robotique IDA est désengagé de sa position d'épinglage, puis la pelle IDA est enfoncée dans le régolithe à côté de la taupe. Positionnée au-dessus de la fosse, la force appliquée sur la pelle IDA est transférée à la taupe par les parois de la fosse jusqu'au régolithe se trouant en dessous. Suite à une première séance de martelage de 50 coups de marteau exécutée sur le même Sol, qui s'est bien déroulé avec un léger mouvement vers le bas. Deux nouvelles séances de martelage de 152 coups de marteau chacun sont commandé au Sol 325 le 26 octobre 2019. Les deux dernières séances de martelage ce sont cependant très mal déroulées, ils ont laissées place à une extraction très rapide de la taupe sur une longueur d'environ 18 cm (Reversal 1), accompagnée d'une augmentation d'inclinaison enregistrée par l'inclinomètre STATIL de 19° à 24° (Figure 38). La pression atmosphérique martienne ne représente que 0,6 % de celle de la Terre, soit l'équivalent terrestre situé à 35 km d'altitude, ce qui n'aide pas la taupe à résister aux rebonds ayant moins de pression pour pousser vers le sol. Les interactions entre une faible pression atmosphérique, conjugué à une faible gravité et des propriétés mécaniques inconnues du régolithe martien constituent un réel défi. Le sismomètre SEIS détecte un nouveau séisme au Sol 325 le 26 octobre 2019 d'une magnitude de 3,7, situé à environ 200 km au sud-ouest du cratère Gusev dans la région de Terra Cimmeria près de la zone de démarcation dichotomie martienne qui sépare les terrains plat du nord des régions plus contrastés du sud avec un dénivelé situé entre 4 et 6 km.

Après plus de trois semaines d'arrêt, les séances de martelages reprennent après avoir ajusté le positionnement de la pelle IDA contre la coque de la taupe au Sol 342 le 13 novembre 2019. En utilisant la méthode d'épinglage des Sols 308 et 318 dont le point d'appuis est cette-fois-si sur élevé du sol à 1,5 cm, dans le but d'exercer une pression horizontale et verticale contre la coque inclinée de la taupe (deuxième phase du mode Pinning, Sols 329-380). Il existe toujours un risque quand la taupe est enfouie trop profondément, que la pelle IDA bascule au-dessus et accroche le capuchon arrière pouvant ainsi endommager l'attache du ruban scientifique Science Tether. Une série de plusieurs séances de martelages étendu sur une durée de plusieurs jours est programmée, dont la première séance est exécuté au Sol 346 avec 40 coups de marteau suivit d'un enfouissement de la taupe de quelques cm. La seconde séance est effectuée trois jours plus tard sur le Sol 349 avec 50 coups de marteau suivit d'un enfouissement de la taupe de 4 cm, avec la pelle IDA qui s'appuis désormais directement sur le régolithe. Entre temps, l'atterrisseur InSight fête son premier anniversaire terrestre sur Mars le 26 novembre 2019 au Sol 355. La troisième séance de martelage est exécutée au Sol 366 avec 19 coups de marteau suivit d'un enfouissement de la taupe de 11 cm. L'avant dernière séance de martelage est exécutée une

Figure 39 : Deuxième phase du mode Pinning entre les Sols 329-380 (Pinning 2)
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

semaine plus tard au Sol 373 avec 127 coups de marteau suivit d'un enfouissement de la taupe de 6 cm, puis la dernière séance de la série est effectuée au Sol 380 le 22 décembre 2019 avec 126 coups de marteau suivit d'un enfouissement de la taupe de 3,5 cm (Figure 39). La taupe s'est enfoncé dans le sol sur une profondeur totale de près de 24,5 cm avec une inclinaison de 27°, et à la fin la calotte arrière de la taupe était à environ 3,5 cm de la surface du régolithe d'origine. Depuis sa mise en service en février 2019, le sismomètre SEIS a détecté plus de 300 évènements sismiques, dont une dizaine avait une magnitude comprise entre 3 et 4. Les séismes de basse fréquence (LF) détecté par les capteurs VBB de SEIS, viendraient de zone profonde située à moins de 50 kilomètres sous la surface et seraient situés à des distances relativement importantes du site d'atterrissage d'InSight. La nature répétitive des séismes détectés en grande partie dans la même zone de la planète, suggèrent que Mars est plus active de ce que l'on pensait auparavant. Leurs découvertes suggèrent que le magma du manteau martien est toujours actif, et qu'il serait responsable en grande partie des tremblements de terre sur Mars.

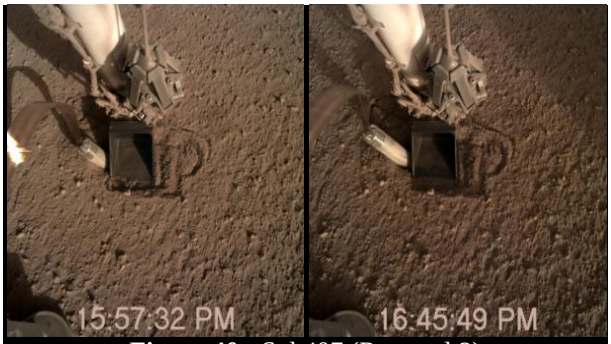


Figure 40 : Sol 407 (Reversal 2)
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Après les vacances du nouvel an, la pelle IDA qui est étendus sur le régolithe martien depuis le Sol 349, est repositionné un peut plus haut contre la taupe et une séance de martelage de 151 coups de marteau est programmée sur le Sol 407 le 19 janvier 2020. Mais au lieu de s'enfoncé plus profondément dans le régolithe, le mouvement de rebond de la taupe par manque d'adhésion et de friction la remportée et à entrainé un deuxième événement d'inversion de la taupe sur environ 5 cm (Reversal 2). Au début de la séance de martelage, la taupe s'est bien enfoncée d'environ 1,5 cm dans le régolithe au cours des 20 premiers coups de marteau, mais le mouvement s'est inversé par la suite et la taupe s'est mise à reculer sur 3,5 cm lors des 110 dernier coups de marteau. La distance entre le capuchon arrière de la taupe et le régolithe est passée de 2 cm à 7 cm (Figure 40). Une série d'essai et de test d'interaction avec le régolithe à l'aide de la pelle IDA (grattage, hachage et effondrement des parois de la fosse) est étudié entre les Sols 414 à 420 (Regolith Interaction 2). Le but est d'affaiblir une partir des parois de la fosse et d'ajouter plus de régolithe sur la taupe pour l'aider à forer plus profondément. Au 30 septembre 2019 (Sol 299), InSight avait déjà détecté plus de 174 événements sismiques de toutes sortes depuis que la campagne scientifique du sismomètre SEIS à débuter au Sol 70. Et cinq mois plus tard le 24 février 2020 (Sol 412) le nombre est passé à 460 frémissements des entrailles de la planète rouge. Seules les séismes associé au tremblement de

Mars (Marsquake) les plus importants ou les séismes d'impactes sont décrit ici (voir l'annexe en fin d'ouvrage).

L'accumulation de régolithe dans la fosse offrira une plus grande friction et une plus grande adhérence entre la coque de la taupe et les parois de la fosse lors des prochaines séances de martelage. En plus, l'accumulation de matériel offre une plus grande résistance pour lutter contre le mouvement de recule et de rebond lors du martelage. La méthode de forage avec prise d'appuis en épingle contre la coque de la taupe est finalement abandonnée, et une nouvelle technique est élaborée pour aider la taupe à pénétrer plus profondément dans le sol martien. La surface inférieure plate de la pelle IDA est placée horizontalement au-dessus du capuchon arrière de la taupe, puis la pelle IDA est abaissée lentement jusqu'à ce qu'elle touche le capuchon. Le bras robotique est ensuite abaissé et tendu pour communiquer une force d'environ 50 newtons entre la pelle IDA et la taupe pour équilibrer la force de recul le plus possible durant le martelage (Back Cap Push : Horizontale Scoop, Sols 427 à 557). L'utilisation de cette méthode de forage avait été évitée jusqu'à présent, car elle risquait trop d'endommager l'attache du ruban d'alimentation et de transfère des données scientifique (Science Tether). Mais les circonstances de la mission ont changé, et le dernier espoir de faire progresser la taupe dans le sol martien est de risquer cette méthode directe. Comme il ne restait que peu d'alternatives, la décision fût prise de risquer le tout pour le tout et d'aider la taupe en appuyant directement sur le capuchon arrière tout en essayant d'éviter d'abimer l'attache. Cette opération délicate nécessite un suivit du positionnement du bras robotique IDA beaucoup plus fin et précis pour chaque séance de martelage, et que chaque repositionnement devra être vérifié soigneusement avec beaucoup de précaution pour ne pas risquer de nuire ou d'abimé l'attache scientifique ou la taupe. Une erreur de quelques millimètres seulement pouvait faire glisser la pelle IDA sur le capuchon arrière et endommager l'attache. Cette nouvelle méthode de pousser sur le capuchon arrière de la taupe sera utilisé sur les prochains 130 Sols (4,5 mois).

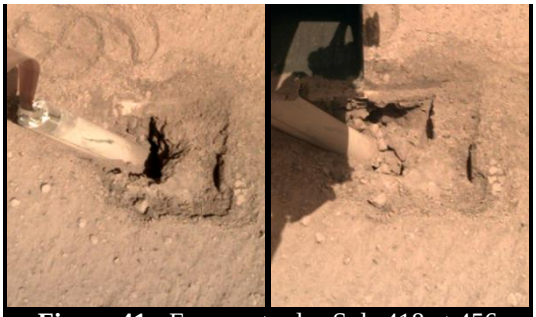
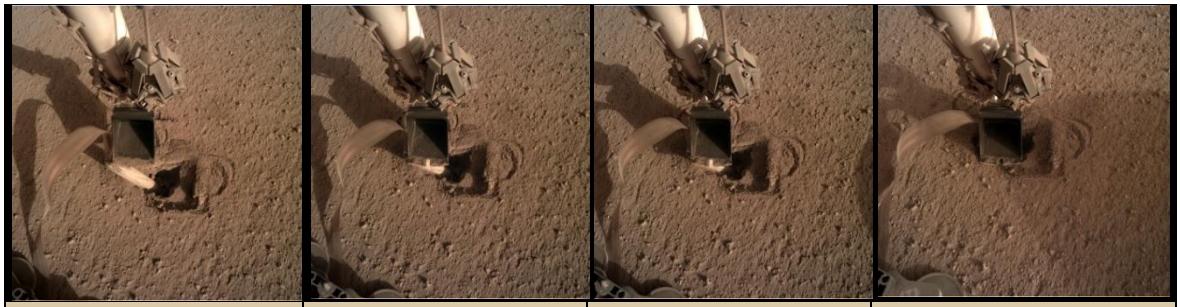


Figure 41 : Fosse entre les Sols 418 et 456 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Deux nouveaux séismes (VBB : LF) sont enregistrés de magnitudes 3,0 et 3,9 dans Cerberus Fossae au Sol 407 et 409 le 19 et 21 janvier 2020. Le bras robotique est soulevé au Sol 417, exposant ainsi la fosse et la dépression laissée par la pelle IDA sur le régolithe. Le but est d'examiner durant les deux semaines suivantes l'environnement immédiat se trouvant au alentour de la fosse, en prêtant une attention particulière au fond et aux parois (Figure 41). La pelle IDA est ensuite appuyée sur le bord du sommet du capuchon arrière de la taupe au Sol 435 le 16 février 2020, suivra ensuite un petit ajustement sur le Sol 453 le 6 mars 2020 pour rapprocher le point d'appui de la pelle IDA vers l'attache du ruban scientifique Science Tether. Un petit séisme de magnitude 2,9 est détecté sur le Sol 484 à 8h48 au matin le 7 avril 2020. Après six cycles de martelage effectués en 11 semaines entre le 11 mars et le 30 mai 2020, soit 78 Sols (Sol 458, 472, 489, 509, 523 et 536). La taupe s'est enfoncée de 8 cm dans le régolithe, et la tête du capuchon arrière est maintenant rendue au niveau du sol avec une inclinaison qui est passé de 27° à 31° (Figure 42). Durant les derniers cycles de martelage, l'équinoxe d'automne a fait son entrée au Sol 486 le 9 avril 2020, et avec lui revient le début de la saison des tempêtes et des tourbillons de poussière. Les capteurs météorologiques d'InSight ont détecté la trace du passage de nombreux tourbillons de poussières



Sol 458	Sol 489	Sol 509	Sol 536

Figure 42 : Back Cap Push : Horizontale Scoop, Sols 427 à 536 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

à basse pression (Dust Devils), mais aucun n'a été photographié. Un nouveau repositionnement de la pelle IDA suivit d'une petite séance de martelage sont effectué au Sol 543 le 6 juin 2020.

Figure 43 : Sol 577

Figure 44 : Sol 600

(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Une semaine plus tard entre les Sols 550 et 557 du 13 au 20 juin 2020, faisant suite a une chute brutale en énergie de près de 450 Whrs/Sol, une série de deux testes de séance de martelage sont programmés (sans tout fois remplir la fosse de sable) pour voir si la taupe est capable de creuser seule sans l'aide de la pelle IDA (Free Mole Test). Cependant pour ses séances de testes, il y aura encore un soutien indirect avec la pelle IDA appuyant sur la surface au-dessus de la taupe. Une première séance de martelage de 125 coups de marteau est exécutée au Sol 550, la pelle IDA est d'abord descendue entrainer par le mouvement descendant de la taupe dans le sol sur environ 1 cm, et a ensuite fait du surplace avec un petit mouvement de recule. La deuxième séance de martelage a été programmée sur le Sol 557 avec 150 coups de marteau, mais les images montrent clairement que l'attache s'est déplacée quelque peut d'avant en arrière, mais le mouvement s'est arrêtée complètement, ce qui suggère que la taupe n'a pas creusé plus loin une fois enfouis sous le sol et quelle ne fait que rebondir dans le trou contre la pèle IDA. L'analyse des séances de testes de forage autonome de la taupe (Free Mole Test) ont durée presque trois semaines, et le bras robotique est finalement levé en milieu de l'après-midi au Sol 577 le 11 juillet 2020 pour vérifier et examiné l'état de la taupe et de la fosse (Figure 43). En raison de récente tempête de poussière, le facteur Tau qui mesure la qualité de la transparence de l'atmosphère a lentement chuté pour atteindre une valeur de 1,2. En conséquence, la production d'énergie a chuté à environ 1 200 Whr/Sol en raison du dépôt de poussière sur les panneaux solaires. Après trois semaines d'arrêt entre les Sols 578 et 597 du 12 juillet au le 1er août 2020, le temps d'étudier et d'analyser l'environnement immédiat de la fosse et de la taupe, qui est maintenant enfoncé jusqu'au raz du sol. La décision fût prise de remplir la fosse avant de poursuivre le forage, un petit nettoyage de terrain s'imposait donc. Au Sol 598 le 2 août 2020, une partie du régolithe situé au nord de la fosse est gratté sur environ 12 cm (Regolith Interaction 3), puis les résidus sont déplacés pour remplir et niveler la fosse et de recouvrir complètement la taupe de régolithe (Figure 44).

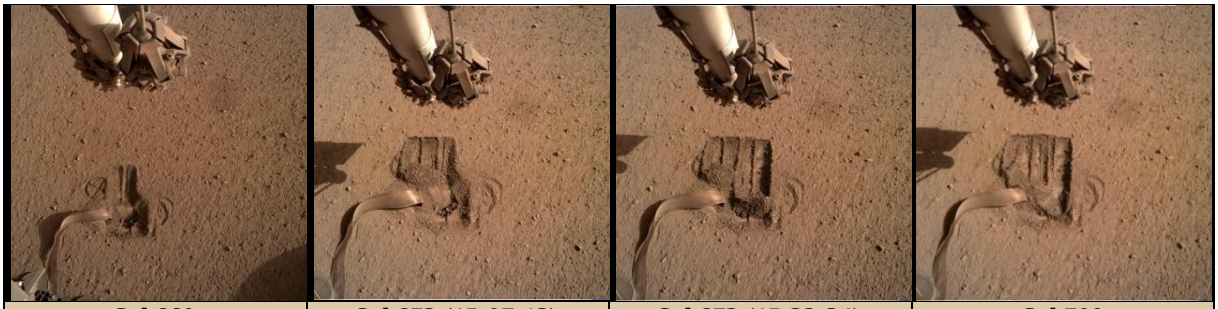
La pelle IDA positionné horizontale et prenant appuis près du capuchon arrière de la taupe (Back Cap Push : Horizontale Scoop), qui a été utilisée lors des précédentes campagnes de poussée. Ne permet pas de descendre plus bas que le niveau de la couche de régolithe se trouant

Sol 618	Sol 632	Sol 645

Figure 45 : Back Cap Push : Vertical Scoop, Sols 604 à 645
(Crédit : NASA/JPL-Caltech)

au raz du sol ou sous la surface. Les différentes actions de grattage et de hachage ont permis d'élargir la fosse, ce qui a permis d'utiliser la pelle IDA de manière inclinée (30° de l'horizontale) pour continuer à appuyer sur le capuchon arrière, en utilisant la pointe de la pelle plutôt que l'arrière du fond plat pour lutter contre les forces de rebond et de recule de la taupe (Back Cap Push : Vertical Scoop, Sols 604 à 645). Après le positionnement de la pelle IDA de manière inclinée sur le bord du capuchon arrière de la taupe entre les Sols 604 et 613. Trois activités de poussée sur le capuchon arrière avec la pelle IDA inclinée ont été programmées pour les Sols 618 avec 101 coups de marteau, au Sol 632 avec également 101 coups de marteau et au Sol 645 (19 septembre 2020), avec cette fois-ci la plus grande séance de martelage effectuée depuis le début de la mission sur Mars avec 252 coups de marteau (Figure 45). Cependant, les trois séances de poussées n'ont pas produit de résultats supplémentaire sur l'enfoncement de la taupe dans le sol martien.

Les capteurs de la station météorologiques APSS (Auxiliary Payload Sensor Suite) embarqué à bord de l'atterrisseur InSight, servant à collecter des données sur la température, la pression de l'air, la vitesse et la direction du vent, ainsi que sur les champs magnétiques. Ont cessés de fonctionner et de fournir des données le 18 août 2020 (Sol 614) en raison d'un problème affectant l'électronique des capteurs. L'APSS est en mode sans échec, et l'ordinateur principal d'InSight ne peut plus récupère les données stockées dans l'ordinateur de contrôle de l'APSS pour les transmettre ultérieurement aux vaisseaux spatiaux en orbite, qui relaient ensuite les données vers la Terre. Le solstice d'hiver arrive le 3 septembre 2020 sur le Sol 632, et trois jours plus tard, même si n'ayant toujours pas trouvé la cause de la défaillance de la station météorologique APSS, l'ordinateur de contrôle des capteurs météorologiques d'InSight est réinitialisé au Sol 635 le 6 septembre 2020, et tout semble de nouveau fonctionner normalement. Le bilan d'énergie qui a toujours tendance a chuté par l'accumulation de poussières sur les panneaux solaires, n'est plus que de 1 085 Whr/Sol, ce qui empêche de fournir une énergie suffisante pour effectuer différentes opérations et pour recharger les batteries. La gestion de la disponibilité de la puissance électrique et le temps de recharge des batteries, fait en sorte que la taupe et la pelle IDA ne peuvent être commandés que tous les quinze jours à partir du mois de septembre. Compte tenu des mouvements peut concluants de la taupe dans la fosse lors des dernières séances de martelages (Sol 618, 632 et 645), cette voie est définitivement abandonnée au profit de l'augmentation d'interaction directe de la taupe avec le régolithe (Figure 46) à partir du 3 octobre 2020 sur le Sol 659 (Regolith Interaction 4, Sol 659–700).



Sol 660	Sol 673 (15:07:12)	Sol 673 (15:32:34)	Sol 700

Figure 46 : Regolith Interaction 4, Sol 659–700 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

L’objectif était désormais de recouvrir la taupe et la fosse de raclures de régolithe, puis d’utiliser le bras robotique pour compacter le matériau et d’exercer une pression sur le sol pour la transférer à la taupe via le régolithe. En remplissant la fosse et en compactant le sol au-dessus de la taupe, ont pouvait offrir une plus grande force d’adhésion et de friction contre les parois de la coque de la taupe, et d’offrir en même temps une plus grande résistance pour lutter contre le mouvement de rebond et de recule lors du martelage. Et contrairement à l’action qui avait été entreprise aux Sols 322 et 325, ou la fosse était restée vide. Il s’agissait cette fois-ci de racler le régolithe et de la verser directement dans la fosse en plusieurs étapes, en tassant le tas avec la pelle IDA du bras robotique après chacune d’elles pour compacter et densifier le matériau, et de vérifier le résultat de remplissage et du compactage par des images IDA prises en hauteur. Une première pelletée de terre est racler et gratter sur environ 12 cm au nord de la fosse, puis vidanger dans la fosse au Sol 659 le 4 octobre 2020.

Figure 47 : Dernière mesure de température (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/CAB)

L’atterrisseur InSight fête sa première année martienne au Sol 669 le 14 octobre 2020, qui marque également la fin de la durée de la phase primaire de la mission. L’opération de raclure et de grattage du sol sur environ 12 cm de long, va de nouveau être reproduite au Sol 673 le 18 octobre. La première mesure de conductivité thermique effectuée par les capteurs TEM-A de la taupe, est effectuée une semaine plus tard sur le Sol 680 le 25 octobre 2020, afin de tirer parti du remplissage de la fosse qui a éliminé l’exposition directe des capteurs à l’atmosphère étant enterré à environ trois centimètres sous la surface (Figure 46). La mesure a ainsi fourni les premières données de conductivité thermique de haute qualité avec une valeur mesurée d'environ 0,04 watts par mètre-kelvin, et qui pouvait couvrir les 40 premiers centimètres du sol. La valeur est inférieure d'un facteur trois à cinq de celle qui est observées dans les sables terrestres. La dernière mesure de température la plus élevé durant le jour a été effectuée sur le Sol 681 avec une valeur de -4,44 °C et de -95,44 °C pour la plus basse température mesurée durant la nuit (Figure 47). Le régolithe nouvellement déposé dans la fosse est ensuite compacté à l’aide de la pelle IDA au Sol 686, et une troisième opération de raclure et de grattage du sol est exécutée deux semaines plus tard sur le Sol 700 le 15 novembre 2020. A partir du Sol 700 avec l’accumulation croissante des poussières sur les panneaux solaires, et un bilan de puissance électrique qui ne fait que décroitre à l’approche de l’aphélie, qui est le point de l’orbite le plus éloigné du soleil. Les opérations au sol sont diminuées à leur stricte nécessaire, et l'énergie restante est consacrée uniquement au fonctionnement du sismomètre SEIS, aux caméras

et à la transmission des données. L'atterrisseur fête son deuxième anniversaire terrestre sur la planète Mars le 26 novembre 2020 sur le Sol 711.

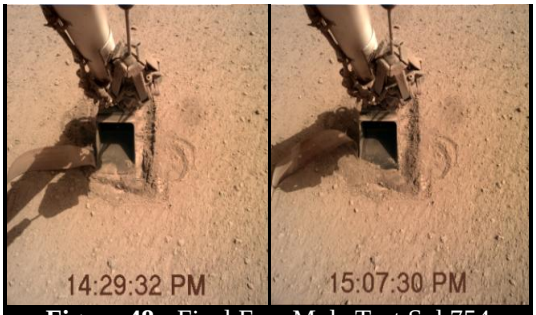


Figure 48 : Final Free Mole Test Sol 754 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

La pelle IDA est déposée à plat sur la fosse au Sol 720, puis ajusté de nouveau pour exercer une pression de surface plus forte sur le Sol 734 le 20 décembre 2020. Le 8 janvier 2021, la mission d'InSight dont la durée nominale s'est achevée le 24 novembre 2020, a été prolongée pour une durée de deux ans jusqu'en décembre 2022. Un nouveau mode de martelage libre (Figure 48) sans assistance, est programmé avec un nombre record de 500 coups de marteau au Sol 754 le 9 janvier 2021 (Final Free Mole Test). Mais encore une fois, aucun mouvement vers l'avant et en profondeur n'est détecté par l'observation de l'attache scientifique, seul une légère variation d'inclinaison est noté passant de 29,5° à 32°. Des particules de régolithes contenus dans la pelle IDA se sont déplacées de manières erratiques, ces mouvements suggère que la taupe tentait de faire marche arrière et de rebondir contre le dos de la pelle IDA. Le test final n'ayant pas été couronné de succès, les tentatives pour aider la taupe à atteindre une plus grande profondeur ont été définitivement abandonnées. Les tentatives visant à enfoncer la taupe dans le sol et la première série complète de mesure du flux thermique planétaire sur Mars ont peut être échoué, mais pas le défi technique rencontré qui a permis de surmonter les différentes opérations à distance grâce à la maniabilité du package de flux de chaleur et de propriétés physiques (HP^3) du centre aérospatial allemand (DLR), qui a été au finale une très grande réussite scientifique et technologique. Obtenir un instrument robotique pour creuser dans le sol martien en visant une profondeur de quelques mètres, était déjà en lui-même un défit que personne n'avait osé faire auparavant, et juste pour cela la mission d'InSight sur Mars peut être qualifié de grande réussite.

La conception de la taupe était basée sur le type de sol meuble et sableux observé lors de précédentes missions sur Mars. La taupe a rencontré un type de sol très différent, qui était étonnamment grumeleux avec des mottes de terre qui collent les uns aux autres et une porosité élevée, qui s'est révélé être très différent de celui rencontré lors des missions martienne de surface précédente. Les propriétés inattendues du sol proche de la surface à côté d'InSight resteront inconnues. Le bras robotique s'est rétracté définitivement de la fosse au Sol 775 le 31 janvier 2021, et les travaux avec la taupe sont abandonnés après 703 Sols (22 mois) de loyaux services. InSight assiste à l'arrivé de l'équinoxe de printemps le 8 février 2021 sur le Sol 784, et les panneaux solaires d'InSight ne produisaient plus que 27 % de leur capacité énergétique.

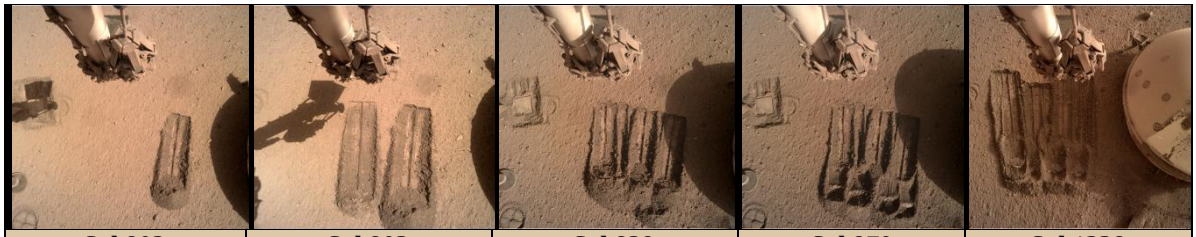


Figure 49 : Évolution des tranchées à gauche de SEIS (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le sismomètre SEIS détecte le dixième séisme d'ampleur depuis le début de la mission sur la planète Mars, au Sol 784 le 9 février 2021 d'une magnitude de 3,3. L'événement est situé plus au sud, et tout comme l'événement du Sol 325 de magnitude 3,7, il est situés sur la dichotomie martienne qui sépare les terrains bas plus jeunes du nord avec ceux des terrains plus haut et plus cratérisé du sud avec un dénivelé allant de 4 à 6 km. L'atterrisseur entame ensuite la construction d'une mosaïque à l'aide de la caméra IDA jusqu'au Sol 789, et une courte impulsion des moteurs de déploiement des panneaux solaires est activé sur le même Sol, dans une ultime tentative audacieuse d'essayer de nettoyer la poussière composée de fine particules brun rougeâtre qui recouvrent les panneaux solaires, mais l'opération n'a pas eut d'effet. Le premier séisme d'impact est détecté sur le Sol 793 le 18 février 2021 avec une magnitude de 1,4, le cratère est situé à l'ouest à plus de 91 km du site d'atterrissage avec un diamètre de 3.9 mètres (Figure 53 A). La dispersion des ondes acoustiques se propageant dans l'atmosphère à partir de la zone d'impact d'une météorite avec le sol, ont également été détecté par SEIS (gazouillis acoustiques, signaux chirp). L'impact au sol avait déjà été imagé quatre mois plus tard dans l'opération de suivit de la sonde InSight par la caméra CTX (The Context Camer) de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 10 juin 2021 (Figure 53 A), mais la relation entre impact et détection de signaux acoustique de type chip n'avait pas encore été fait par SEIS (la relation date de 2022).

Le même jour au Sol 793 le 18 février 2021, s'est l'arrivée tend attendu du rover Perseverance de la mission Mars 2020 de la NASA (voir le troisième chapitre), qui s'est posé dans le cratère Jezero situé à plus de 3 600 km à l'ouest du site d'atterrissage d'InSight. Un deuxième test TEM-A avec une taupe entièrement enterrée est réalisé au Sol 795. InSight se met également à creusé de longue tranchées sur le terrain juste à gauche du sismomètre SEIS à partir du Sol 802 le 27 février 2021. Sur le même Sol, le sismomètre SEIS enregistre un nouveau petit séisme à 6h07 du matin (voir l'annexe). Les tranchées seront creusées et élargis par la suite à plusieurs autres reprises au court de la mission jusqu'au Sol 1238 le 21 mai 2022 (Figure 49). La deuxième tranchée ouverte à gauche de la première sur le sol 803, a été réalisée avec 4 passages de la pelle IDA, contrairement à la première tranchée qui a nécessité qu'un seul passage. Le sismomètre SEIS observe un séisme de magnitude 3,3 sur le Sol 809 à 11h09 le 7 mars 2021 (Cerberus Fossae). Une procédure d'ensablement du câble reliant le sismomètre au vaisseau spatial est effectué au Sol 816 le 14 mars (Figure 50), ayant comme objectif de protéger le câble des vibrations dut par l'action du vent. Cette opération d'ensablement sera par la suite répétée à plusieurs autres reprises entre les mois d'avril et mai 2021 (Sol 856, 863, 870 et 877), puisant

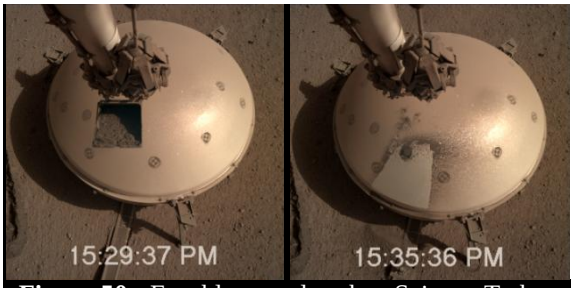


Figure 50 : Ensablement du ruban Science Tether

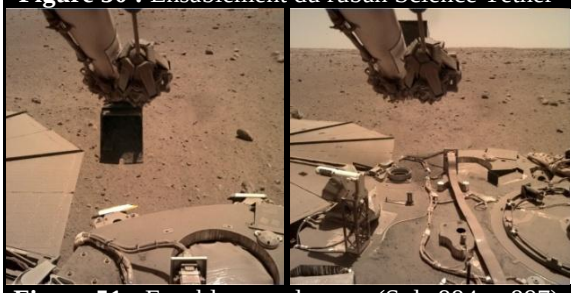


Figure 51 : Ensablement du pont (Sols 884 et 897)

Figure 52 : Activité du bras au Sol 891 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

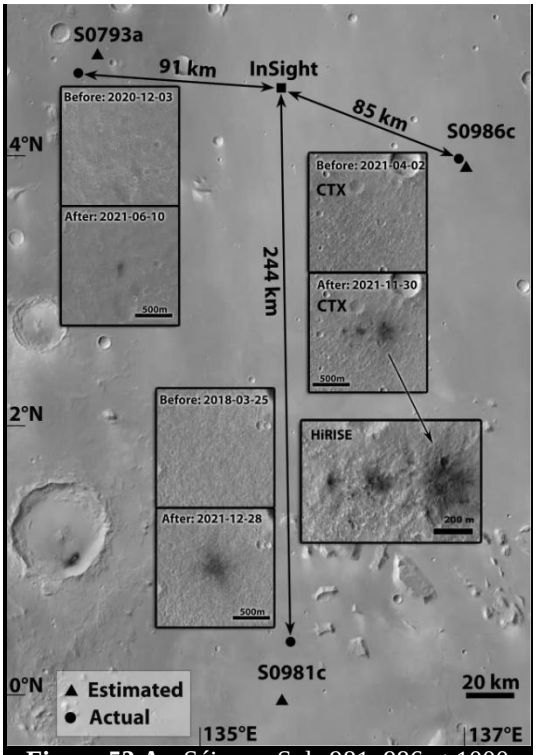


Figure 53 A : Séismes Sols 981, 986 et 1000 (Crédit : NASA/JPL/MSSS/U Arizona)

à chaque fois du régolithe avec la pelle IDA tout en élargissant les tranchées situées à gauche du sismomètre SEIS.

Le sismomètre SEIS observe un deuxième séisme d'importance de magnitude 3,3 dans le même mois au Sol 820 à 14h51 le 18 mars 2021 (Cerberus Fossae). La mission chinoise Tianwen-1/Zhurong se pose avec succès sur Mars dans la région d'Utopia Planitia le 14 mai 2021 au Sol 876 (voir le chapitre suivant). Le bras robotique de l'atterrisseur fait ensuite couler du sable au-dessus du pont de l'atterrisseur au Sol 884 le 22 mai (Figure 51 et 52), cette opération de saltation sera également effectuée à plusieurs autres reprises durant le reste de la mission (897, 911, 939, 1061, 1143 et 1238). Il s'agit d'un moyen innovant pour essayer d'augmenter l'énergie du vaisseau spatial à un moment où ses niveaux de puissance sont en baisse. Le procéder consiste placer le bras d'InSight au-dessus du pont de l'atterrisseur, suffisamment haut vers midi à l'heure la plus venteuse de la journée, et à faire couler du sable pour aider le vent soufflant du nord-ouest à une vitesse maximale de 6 mètres par seconde à emporter une partie de la poussière du panneau. Le résultat de cette opération a été un gain d'environ 30 Whr/Sol. La quantité d'énergie disponible pour l'atterrisseur est passée de près de 5 000 Whrs/Sol peu après son atterrissage en novembre 2018 à moins de 700 Whrs/Sol actuellement. Le sismomètre SEIS enregistre le plus grand événement sismiques rencontré jusqu'à maintenant sur Mars au Sol 976 le 25 août 2021 de magnitude 4,2, dont l'origine a été localisée à 8 500 kilomètres de distance près de la vallée profonde Valles Marineris. Il s'agit du tremblement de terre le plus éloigné que l'atterrisseur a détecté jusqu'à maintenant. Le deuxième solstice d'été arrive dans l'hémisphère nord de la planète le même jour au Sol 976, avec un bilan d'énergie qui est toujours en baisse avec un niveau quotidien d'environ 730 Whrs/Sol.

Trois nouveaux séismes d'impacts sont détectés en moins de trois semaines, mais à l'époque on ne savait pas encore qu'il s'agissait de séisme d'impacte, pour cela il a fallut attendre la découverte de la corrélation avec l'imagerie orbitale de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) qui est venu plus tard suite au réexamen des images avec les données de SEIS. Le premier est enregistré sur le Sol 981 le 31 août 2021 avec une magnitude de 1,6 situé au sud du site d'atterrissage d'InSight à plus de 241 km avec un diamètre de 7,24 mètres (Figure 53 A). L'impact au sol avait été imagé cinq mois plus tard par la caméra CTX (The Context Camer)[49] de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 28 décembre 2021. Le second séisme d'impacte a été observé au Sol 986 le 5 septembre 2021 avec une magnitude de 2,1[50]. Il est situé au sud-est du site d'atterrissage de InSight à seulement 85 km. La météorite s'est brisée en trois fragments avant de toucher le sol et a dessinée un alignement de trois petits cratères, le cratère principal a un

[49] Two Seismic Events from InSight Confirmed as New Impacts on Mars, 23 September
[50] NASA's InSight 'Hears' Its First Meteoroid Impacts on Mars

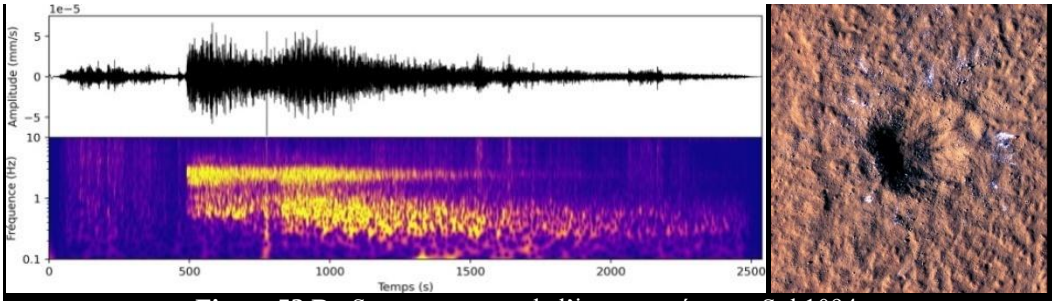


Figure 53 B : Spectrogramme de l'impacte géant au Sol 1094
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/IPGP & NASA/JPL-Caltech/Université de l'Arizona)

diamètre de 6,1 mètres (Figure 53 A). L'impact au sol avait déjà été imagé près de trois mois plus tard par la caméra contextuelle en noir et blanc CTX (The Context Camer) de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 30 novembre 2021[51], mais la corrélation avec les signaux acoustique chirp avec les détections de SEIS n'avait pas encore été effectuée.

Il s'agit en réalité du premier séisme d'impacte qui a été corrélé et confirmé le 19 septembre 2022 par les données du sismomètre SEIS et l'imagerie orbitale. La découverte d'un cratère d'impacte à la surface martienne en relation avec des signaux sismiques a été effectuée en comparant des images d'une même région avant et après la collision (images CTX, MARCI et HiRISE de MRO) avec certain type de signaux du sismomètre SEIS. C'est à partir de l'analyse du même type de signaux sonores (signaux acoustique chirp) et la révision des images fournis par l'imagerie orbitale, qui ont permis de fournir des emplacements de ciblage pour l'identification de trois autres événements d'impactes associés aux séismes enregistrés aux Sols 553, 793 et 981 (Figure 53 A). Le troisième séisme d'impacte de plus grande ampleur a été détecté le 18 septembre 2021 sur le Sol 1000 d'une magnitude plus grande de 4,1. Le cratère d'impacte est à plus de 7 476 km situé dans la région de Tempe Terra au nord-est du plateau de Tharsis Montes avec un diamètre d'environ 140 mètres. Le cratère avait été photographié dès le lendemain par la caméra Mars Color Imager (MARCI) à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) de la NASA (Figure 53 A). Il a la particularité d'être le plus long signal à être enregistrée sur Mars d'une durée de 94 minutes. Les deux séismes observés aux Sols 976 et 1000 sont les premiers événements sismique à se produire de l'autre côté de la planète par rapport à l'atterrisseur, et ils sont cinq fois plus puissants que le précédent événement le plus important enregistré. Le sismomètre a identifié un total de plus de 930 séismes traditionnels jusqu'ici. Le sismomètre d'InSight détecte généralement les tremblements de terre la nuit, lorsque la planète se refroidit et que les vents sont faibles. Mais les signaux de ces deux tremblements de terre étaient suffisamment importants pour dépasser tout bruit causé par le vent. Ses deux tremblements de terre se sont produits pendant la journée au moment le plus venteux, ils sont diffèrent sur plusieurs points importants. Le séisme du Sol 976 se caractérise uniquement par une énergie à basse fréquence (VBB), comme la plupart des séismes identifiés jusqu'à présent sur la planète, tandis que celui du Sol 1000 possède un spectre de fréquences très large (SP).

La deuxième conjonction solaire se produit trois semaines plus tard entre le 30 septembre et le 18 octobre 2021 (Sols 1019-1037). Durant cette pose des communications obligée, InSight sera en mode d'opération minimal avec quelques activités qui ont été programmées à l'avance. À

[51] Newly formed craters on Mars located using seismic and acoustic wave data from InSight

la sortie de la conjonction solaire, le sismomètre SEIS détecte un nouveau séisme d'impacte de magnitude 3,0 au Sol 1034 le 23 octobre 2021, et qui est le plus près du site d'atterrissage d'InSight. Il est situé au sud à seulement 48 km avec un diamètre de 9,2 mètres (Figure 55 A et B). L'impact au sol a été imagé deux mois plus tard par la caméra CTX (The Context Camer) de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 28 décembre 2021. Sur le Sol 1066 le 26 novembre 2021, InSight fête son troisième anniversaire terrestre sur la planète Mars. Le sismomètre SEIS a détecté un impact de météorite géante (Christmas Eve) au milieu de l'après-midi le 24 décembre 2021 au Sol 1094 d'une magnitude de 4,0 (toujours avec signaux acoustique chirp), situé au nord-est à plus de 3462 km de l'atterrisseur InSight et mesurant environ 150 mètres de diamètre sur 21 mètres de profondeur avec une masse estimée entre 250 et 650 tonnes (Figure 53 B). Ce séisme a été le premier à produire des ondes de surface, ondes qui ondule le long de la surface de la croûte planétaire et qui permet de déterminer sa structure à des profondeurs comprises entre 5 et 30 kilomètres. Dès le lendemain, la caméra Mars Color Imager (MARCI) à bord du Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) de la NASA avait photographié le lieu d'impacte dans la région d'Amazonis Planitia, mais toujours sans avoir effectué de corrélation avec les signaux SEIS. Le cratère a été repéré pour la première fois le 11 février 2022 par des scientifiques travaillant au Malin Space Science Systems (MSSS) en examinent des images prises à l'époque. Les traces blanches sur l'image de la figure 53 : B, montrent que des blocs de glace d'eau de la taille d'un rocher autour du bord du cratère, qui étaient contenue auparavant dans le sous-sol et qui ont été éjectés lors de l'impact. La taille de la météorite a été estimée entre 5 et 12 mètres, suffisamment petit pour qu'elle brûle en entrant dans l'atmosphère terrestre, mais pas dans la fine atmosphère très tenue de Mars qui est moins dense que celle de notre planète (0,6%).

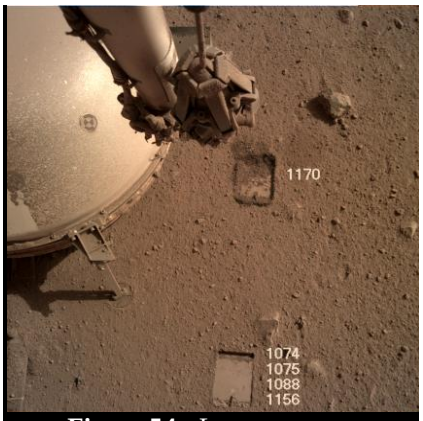


Figure 54 : Les empruntes (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

L'atterrisseur InSight est passé en mode sans échec le 5 janvier 2022 au Sol 1105 à la suite d'une importante tempête de poussière régionale, qui a réduit la lumière du soleil atteignant ses panneaux solaires. La tempête de poussière a été détectée pour la première fois par la caméra Mars Color Imager (MARCI) à bord du Mars Reconnaissance Orbiter de la NASA, qui crée quotidiennement des cartes couleur de la planète entière. Ces cartes permettent aux scientifiques de surveiller les tempêtes de poussière et peuvent servir de système d'alerte précoce pour les engins spatiaux qui se trouvent à la surface martienne. En mode sans échec, un vaisseau spatial suspend toutes ses fonctions sauf celles considéré essentielles. Le contact avec InSight est rétabli au Sol 1129 le 29 janvier 2022. L'équinoxe d'automne arrive le 25 février 2022 au Sol 1154 et avec lui revient la saison des tempêtes et des tourbillons de poussières, avec l'espoir cette fois-ci que l'une d'entre elle pourrait passer près pour nettoyer les panneaux d'InSight. Ce phénomène éolien de nettoyage s'est déjà produit à plusieurs reprises avec les astromobile Spirit et Opportunity au court de leur mission martienne, et qui leur a permis de durer beaucoup plus longtemps que la durée de vie qui leur avait été initialement prévue. Au Sol 1074 le 4 décembre 2021 le bras robotique d'InSight laisse une première emprunte de la pelle IDA sur le régolithe qui se trouve dans la partie sud-est du sismomètre SEIS, cette opération sera par la suite effectuée sur plusieurs autres Sols durant la mission (1075, 1088 et 1156). Une deuxième emprunte est dessiné en milieu d'après midi sur le régolithe situé plus haut sur le côté droit du sismomètre SEIS au Sol 1170 le 13 mars 2022 (Figure 54).

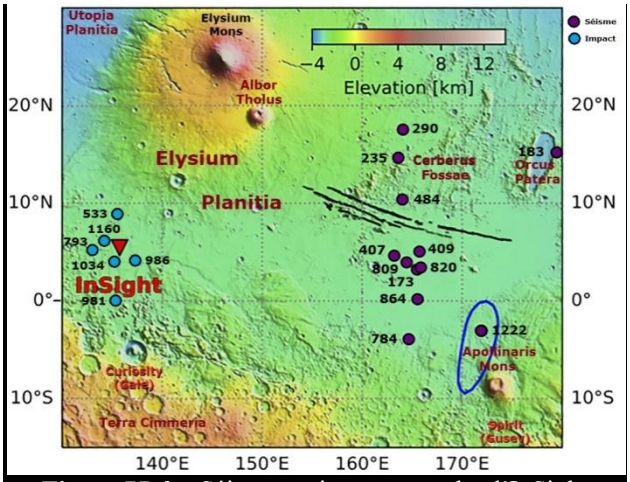


Figure 55 A : Séismes et impacts proche d'InSight (Crédit : MOLA Science Team & IPGP)

Les séismes détectés par l'instrument SEIS (Figure 55 A) se révèlent plus nombreux que prévu, mais d'une intensité plus faible (magnitude maximum autour de 4). Les informations recueillies lors de ces séismes ont permis aux scientifiques de mesurer la profondeur et la composition de la croûte, du manteau et du noyau de la planète Mars (résumé dans trois articles parues dans la revue Science en juillet 2021[52-53-54]). Malgré la faiblesse des signaux sismiques, les scientifiques déterminent que la croûte plus fine que prévu et fortement fracturée a une épaisseur comprise entre 24 et 72 kilomètres. L'analyse a mis en évidence trois discontinuités très nettes de la croûte, soit vers 9, 20 et 39 km de profondeur. La limite entre la croûte et le manteau, également appelé limite de Moho, serait situé à une profondeur comprise entre 30 et 50 km. Le manteau sous la surface à une épaisseur moyenne de 1 560 km, comprenant une zone de transition située entre 1 110 et 1 170 kilomètres sous InSight, ou les silicates de magnésium et de fer subissent un changement géochimique. Au-dessus de cette limite il y a les minéraux formée à partir de l'olivine, et en dessous comprimé par une forte pression et la chaleur les minéraux change de réseaux cristallin pour former un nouveau minéral appelé wadsleyite (silicate : $(Mg,Fe^{II})_2SiO_4$).

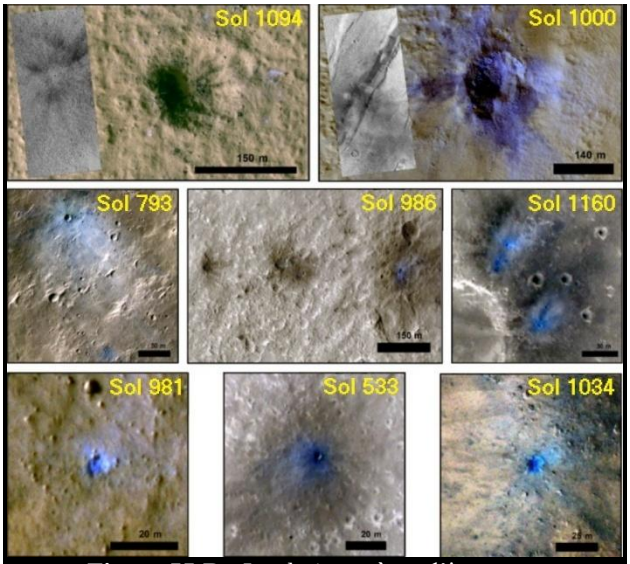


Figure 55 B : Les huit cratères d'impactes (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona)

Avec les premières détections d'ondes sismiques de longue distance ayant transitées par le noyau martien (ondes de surface SKS[55] qui se propage sous forme d'onde de cisaillement dans la croûte et le manteau et sous forme d'onde de compression dans le noyau). Mesure qui a été effectuée lors des événements S0976a (Sol 976) de magnitudes 4,2, dont l'épicentre est situé à plus de 8 500 km dans Valles Marineris sur une profondeur d'environ 50 km. Et de S1000a (Sol 1000) de magnitudes 4,1 situé à 7 476 km dans Tempe Terra au nord-est de Chryse Planitia, ou se sont posés Viking 1 et Mars Pathfinder, ce dernier résulte d'un impact ayant laissé un cratère de 140 mètres de diamètre (Figure 55 B). La frontière entre le manteau de Mars et le noyau (LNM pour limite noyau-manteau) riche en fer et en soufre (avec une composition en éléments

[52] Upper mantle structure of Mars from InSight seismic data, July 2021
[53] Thickness and structure of the martian crust from InSight data, July 2021
[54] Seismic detection of the martian core, July 2021
[55] First observations of core-transiting seismic phases on Mars, April 24, 2023

légers de 20,3 à 21,4 %) a été estimée à environ 1 530 à 1 580 km sous l'atterrisseur, et que le rayon du noyau métallique partiellement liquide plus petit que prévu serait compris entre 1 780 et 1 810 kilomètres (selon les modèles de composition du noyau), se situant à la limite supérieure des prévisions. Mars ne possèderait donc pas de manteau inférieur. La mission révèle ainsi une caractéristique importante sur la minceur de la couche (le manteau) située entre le noyau et la croûte, qui a dû entraîner le refroidissement rapide de la planète. Sur Terre les tremblements de terre proviennent de failles provoquées par le déplacement des plaques tectoniques. Mars n'a pas de plaques tectoniques et sa croûte ressemble plutôt à une assiette géante. Les séismes sur Mars proviennent de volcans, quand ses derniers sont actifs, de glissement et d'effondrement de terrains, de chute de météorites et d'activité de failles ou de fractures rocheuses. Des zones de tension et de friction se forment encore dans la croûte martienne en raison des contraintes provoquées par le léger rétrécissement de la planète à mesure qu'elle continue de se refroidir. La lithosphère, c'est-à-dire l'enveloppe rigide externe d'une planète rocheuse constituée de la croûte et du sommet du manteau, aurait une épaisseur de 500 km. Les données sur les tremblements de terre sur Mars révèlent la nature grumeleuse de l'intérieur de la planète rouge, le manteau est constellé de fragments composés de débris massifs d'impacts anciens[56]. Leur survie jusqu'à aujourd'hui indique que le manteau de Mars a évolué lentement pendant des milliards d'années.

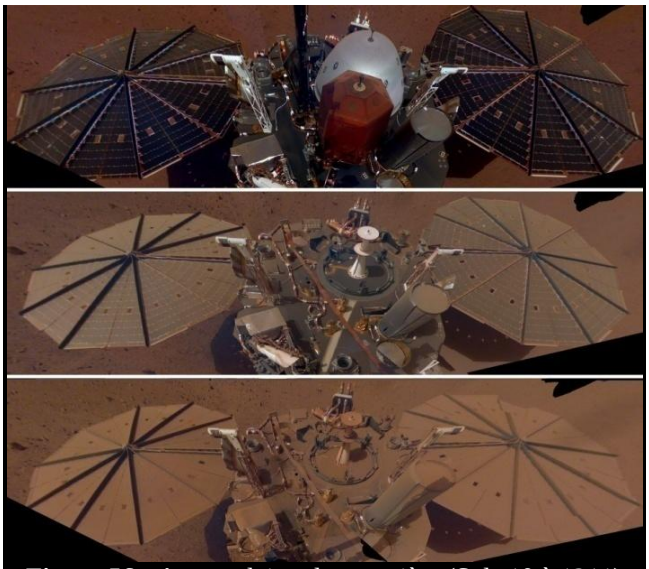


Figure 56 : Accumulaion de poussière (Sols 10 à 1211) (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le tout dernier séisme d'impacte de la mission de l'atterrisseur InSight sur Mars est enregistré sur le Sol 1160 le 2 mars 2022. Il s'agit d'une petite secousse sismique d'une magnitude de 1,5 qui est situé à 60 km au nord-est de l'atterrisseur avec un diamètre de 3,2 mètres. L'impact a été imagé six mois et demi plus tard par la caméra CTX (The Context Camer) de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 24 septembre 2022 (Figure 55 B[57]). Un nouveau selfie couleur de l'atterrisseur est entamé le 24 avril 2022 au Sol 1211. La figure 56 nous montre un comparatif de l'accumulation de poussières sur les panneaux solaire entre le Sol 10 (6 décembre 2018) pour l'image du haut. La seconde vue au centre est composé d'une mosaïque de 14 images prises entre les Sols 106 et 133 (du 15 mars au 11 avril 2020), et finalement au Sol 1211 (24 avril 2022) pour l'image du bas. Le 4 mai 2022 sur le Sol 1222, le sismomètre SEIS a détecté le séisme le plus puissant jamais mesuré sur une autre planète avec une magnitude estimé à 5,0, (qui a également produite des ondes de surface), dont l'épicentre se trouve dans la région de failles et de fractures Cerberus Fossae. Il s'agit du dernier événement sismique qui sera observé par SEIS. Ce dernier séisme s'ajoute au catalogue de plus de 1 319 tremblements de terre détectés depuis son atterrissage sur Mars, y compris les huit tremblements de terre provoqués par des impacts de météorites[58]. InSight a démontré qu'un sismomètre peut

[56] NASA Marsquake Data Reveals Lumpy Nature of Red Planet's Interior, Aug. 28, 2025
[57] Les événements sismiques martiens détectés par Insight sont confirmés comme impacts
[58] Mars InSight Events (Data Services)

identifier et localiser les impacts sur Mars dans un rayon de quelques centaines de kilomètres grâce à la présence d'un signal sismique-acoustique chirp, et que de rares impacts de grande ampleur sur Mars peuvent être détectés à l'échelle mondiale.

Figure 57 : Dernière activité du bras (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

L'énergie disponible de l'atterrisseur est tombée juste en dessous de la limite qui déclenche le mode de sécurité sans échec. En raison de la puissance réduite, la toute dernière activité du bras robotique a été de se placée au-dessus de la zones des tranchées dans une position de repos (pose de retraite) au Sol 1239 le 22 mai 2022 (Figure 57). Et vers la fin du mois de juin 2022, tous les instruments, à l'exception des récepteurs VBB du sismomètre, ont été éteints. InSight dispose d'un système de protection contre les pannes, et ce système est programmé pour déclencher automatiquement le « mode sans échec » lorsque la sonde rencontre des situations menaçantes, et arrête toutes ses fonctions sauf les plus essentielles. Cela laissera l'atterrisseur sans protection contre des événements soudains et inattendus, mais c'est la désactivation de se système qui permet au sismomètre SEIS de resté activé. Une faible puissance et des températures qui dérivent en dehors des limites prédéterminées peuvent déclencher le mode sans échec. Pour permettre au sismomètre de continuer à fonctionner le plus longtemps possible, le système de protection contre les pannes a été désactive. Même si cela permettra à l'instrument de fonctionner plus longtemps, cela laissera l'atterrisseur sans protection contre des événements soudains et inattendus auxquels les contrôleurs au sol n'auraient pas le temps de réagir. Au mois d'août 2023, soit plus de six mois après la fin de la mission d'InSight sur Mars, une étude de l'expérience RISE[59] qui servait à suivre la vitesse de rotation de la planète appuyés sur l'un des instruments d'InSight : un transpondeur radio et des antennes appelés collectivement l'expérience de rotation et de structure intérieure, ou RISE, a démontré que la rotation de la planète s'accélère d'environ 4 milliardième de secondes par année, ce qui correspond à un raccourcissement de la durée du jour martien d'une fraction de milliseconde par année.

Figure 58 : Vue HiRISE de MRO à 274 km d'altitude entre le 6 décembre 2018 (Sol 10), le 4 février 2019 (Sol 68) et le 9 mars 2022 (Sol 1165). Le point lumineux est le bouclier du sismomètre SEIS (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona)

Sur le Sol 1309 le 2 août 2022, les panneaux solaire d'InSight générait en moyenne que 400 Whrs/Sol. À cette époque, une tempête de poussière régionale de la taille d'un continent

[59] Une étude de la NASA InSight révèle que Mars tourne plus vite, 07 août 2023

Figure 59 : InSight sur Mars (Crédit : IPGP/Nicolas Sarter)

tourbillonnait au-dessus de l'hémisphère sud de Mars. Elle a été observée pour la première fois par l'orbiteur Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 21 septembre 2022, la tempête se trouvait alors à environ 3 500 kilomètres d'InSight. Le niveau de puissance de l'atterrisseur diminue régulièrement à mesure que la poussière s'accumule sur ses panneaux solaires. L'atterrisseur InSight fête sa deuxième année martienne au Sol 1338 le 31 août 2022. Le lundi 3 octobre sur le Sol 1369, la tempête était devenue suffisamment grande et soulevait tellement de poussière avec des vents soufflant jusqu'à 97 kilomètres par heure, que l'épaisseur de la brume poussiéreuse dans l'atmosphère martienne avait augmenté de près de 40 % autour d'InSight. Avec moins de lumière solaire atteignant les panneaux de l'atterrisseur, son énergie est passée de 425 Whrs/Sol à seulement 275 Whrs/Sol. Le sismomètre d'InSight est toujours en fonction, mais la baisse d'énergie produit par les panneaux solaire ne permet pas de recharger complètement les batteries à chaque Sol. Ainsi, pour économiser l'énergie et d'éviter que les batteries se vide complètement le sismomètre d'InSight est éteint. Près de trois mois plus tard sur le Sol 1421 le 26 novembre 2022, InSight fête son quatrième anniversaire terrestre sur la planète Mars. Au 29 novembre 2022 (Sol 1424), InSight générait en moyenne 290 Whrs/Sol. Le facteur tau, qui évalue le niveau d'opacité dans l'atmosphère provoqué par la poussière en suspension, était de 0,95 contre une moyenne normale de 0,6 en dehors de la saison des tempêtes de poussières. Les dernières images prises par la caméra IDC et ICC a été sur le Sol 1436 le 11 décembre 2022.

La dernière fois qu'InSight a communiquée avec la Terre a été sur le Sol 1440 le 15 décembre 2022 (1480 jours terrestre). Et six jours plus tard, vue de l'accumulation de la poussière sur les panneaux solaires et à court d'énergie. La NASA annonce la fin de la mission le 21 décembre 2022 au Sol 1446, après deux tentatives infructueuses d'entrer en contacte avec la sonde (18 décembre 2022). La mission InSight de la NASA a pris fin après plus de quatre ans et 19 jours de collecte de données scientifiques uniques sur Mars.

Figure 60 : InSight sur Mars (Credit : NASA/JPL/University of Arizona & CNES/IPGP/Manchu/Bureau 21)

ANNEXE

Liste des Forages de Curiosity							
	Nom	**Forage**	**Durée**	**Élévation (−4501 m)**	**Dénivelé (Mètre)**	**Date du Forage**	**Formation Sédimentologiques**
1	John Klein	Sol 182	Sol 162-272	-4520,33	-19,33	9 février 2013	YB/Lacustre
2	Cumberland	Sol 279	Sol 272-96	-4520,24	-19,24	19 mai 2013	YB/Lacustre
3	Windjana	Sol 621	Sol 609-29	-4478,55	22,45	5 mai 2014	Kimberley/Fluvio-lacustre
4	Confidence Hills	Sol 759	Sol 753-79	-4460,51	40,49	25 septembre 2014	Murray/Lacustre
5	Mojave 2	Sol 882	Sol 864-95	-4459,56	41,44	29 janvier 2015	Murray/Lacustre
6	Telegraph Peak	Sol 908	Sol 903-22	-4453,02	47,98	24 février 2015	Murray/Lacustre
7	Buckskin	Sol 1060	Sol 1056-66	-4447,00	54	30 juillet 2015	Murray/Lacustre
8	Big Sky	Sol 1119	Sol 1112-26	-4434,42	66,58	29 septembre 2015	Stimson/Éolien
9	Greenhorn	Sol 1137	Sol 1127-43	-4434,23	66,77	18 octobre 2015	Stimson/Éolien
10	Lubango	Sol 1320	Sol 1317-28	-4429,04	71,96	23 avril 2016	Stimson/Éolien
11	Okoruso	Sol 1332	Sol 1329-43	-4429,17	71,83	5 mai 2016	Stimson/Éolien
12	Oudam	Sol 1361	Sol 1357-69	-4435,68	65,32	4 juin 2016	Murray/Éolien & Fluviale
13	Marimba	Sol 1422	Sol 1417-27	-4410,68	90,32	6 août 2016	Murray/Lacustre
14	Quela	Sol 1464	Sol 1457-67	-4379,26	121,74	18 septembre 2016	Murray/Lacustre
15	Sebina	Sol 1495	Sol 1489-98	-4360,89	140,11	20 octobre 2016	Murray/Lacustre
16	Duluth	Sol 2057	Sol 2053-85	-4191,63	309,37	20 mai 2018	Murray/Lacustre
17	Stoer	Sol 2136	Sol 2132-55	-4170,39	330,61	9 août 2018	Murray/Lacustre
18	Highfield	Sol 2224	Sol 2222-49	-4146,75	354,25	8 novembre 2018	Murray/Lacustre
19	Rock Hall	Sol 2261	Sol 2257-95	-4143,69	357,31	16 décembre 2018	Murray/Lacustre
20	Aberlady	Sol 2370	Sol 2365-80	-4157,79	343,21	7 avril 2019	Murray/Lacustre
21	Kilmarie	Sol 2384	Sol 2381-2408	-4157,93	343,07	21 avril 2019	Murray/Lacustre
22	Glen Etive 1	Sol 2486	Sol 2484-2524	-4132,99	368,01	4 août 2019	CS/Fluviale
23	Glen Etive 2	Sol 2527	Sol 2525-55	-4132,95	368,05	15 septembre 2019	CS/Fluviale
24	Hutton	Sol 2668	Sol 2664-90	-4095,84	405,16	7 février 2020	CS/Lacustre
25	Edinburgh	Sol 2711	Sol 2702-28	-4088,44	412,56	22 mars 2020	Stimson/Éolien
26	Glasgow	Sol 2754	Sol 2747-79	-4108,06	392,94	5 mai 2020	CS/Lacustre
27	Mary Anning	Sol 2838	Sol 2829-54	-4107,80	393,2	31 juillet 2020	CS/Fluviale
28	Mary Anning 3	Sol 2870	Sol 2866-2904	-4107,80	393,2	2 septembre 2020	CS/Fluviale
29	Groken	Sol 2910	Sol 2904-22	-4107,80	393,2	13 octobre 2020	CS/Fluviale
30	Nontron	Sol 3056	Sol 3052-71	-4072,90	428,1	12 mars 2021	CS/Fluvio-lacustre
31	Bardou	Sol 3094	Sol 3088-3108	-4066,50	434,5	20 avril 2021	CS/Fluvio-lacustre
32	Pontours	Sol 3170	Sol 3163-82	-4041,20	459,8	7 juillet 2021	CS/Fluvio-lacustre
33	Maria Gordon	Sol 3229	Sol 3222-46	-4016,00	485	6 septembre 2021	Mirador/Éolien
34	Zechstein	Sol 3289	Sol 3286-3312	-3992,00	513	6 novembre 2021	Mirador/Éolien
35	Avanavero	Sol 3512	Sol 3510-30	-3910,00	591	23 juin 2022	Mirador/Éolien
36	Canaima	Sol 3612	Sol 3602-28	-3880,00	623	3 octobre 2022	Mirador/Éolien
37	Tapo Caparo	Sol 3752	Sol 3750-71	-3853,00	648	25 février 2023	Mirador-lacustre
38	Ubajara	Sol 3823	Sol 3815-39	-3826,00	675	9 mai 2023	Mirador
39	Sequoia	Sol 3980	Sol 3974-4028	-3764,00	737	18 octobre 2023	Mirador
40	Mineral King	Sol 4107	Sol 4102-28	-3730,00	771	24 février 2024	Mirador
41	Mammoth Lake	Sol 4219	Sol 4200-37	-3688,00	813	19 juin 2024	Mirador
42	Kings Canyon	Sol 4263	Sol 4255-82	-3673,00	828	3 août 2024	Mirador
43	Altadena	Sol 4564	Sol 4564-71	-3647,00	854	8 juin 2025	
44	Valle de la Luna	Sol 4693	Sol 4687-4709	-3610,00	891	19 octobre 2025	
45	Nevado Sajama	Sol 4718	Sol 4711-40	-3608,00	893	13 novembre 2025	
46	Nevado Sajama2	Sol 4795	Sol 4789-4805	-3608,00	893	31 janvier 2026	
47	Campo Marte	Sol 4897	Sol 4897-4912	-3569,00	930	16 mai 2026	
48		Sol 5024				22 septembre 2026	

Code couleur : Mudstone : Boue/Argile, Sandstone : Grès éolien, Intermédiaire : Grès éolien/Conglomérat
YB : Yellowknife Bay, CS : Carolyn Shoemaker
Élévation : au-dessus du niveau de référence (−4501 mètre)

Curiosity's 42 Drill Holes : https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA26403
PDS Geosciences Node : https://an.rsl.wustl.edu/msl/AN/an3.aspx

Liste des Forages Ratés de Curiosity							
	Nom	**Forage**	**Durée**	**Élévation (−4501m)**	**Élévation (Mètre)**	**Date du Forage**	**Lieu**
1	Mojave	Sol 867	Sol 863-896	-4460	41	13 janvier 2015	Pahrump Hills : Pink Cliffs
2	Lake Orcadie 1	Sol 1977	Sol 1962-1982	-4145	356	27 février 2018	Vera Rubin Ridge
3	Lake Orcadie 2	Sol 1983	Sol 1983-1985	-4145	356	5 mars 2018	Vera Rubin Ridge
4	Voyageurs	Sol 2112	Sol 2108-2115	-4165	376	16 juillet 2018	Vera Rubin Ridge
5	Ailsa	Sol 2122	Sol 2120-2126	-4145	356	26 juillet 2018	Vera Rubin Ridge
6	Inverness	Sol 2170	Sol 2163-2214	-4150	351	13 septembre 2018	Vera Rubin Ridge
7	Amapari 1	Sol 3676	Sol 3672-3681	-3860	641	9 décembre 2022	Gediz Vallis : MBV
8	Amapari 2	Sol 3682	Sol 3682-3687	-3860	641	15 décembre 2022	Gediz Vallis : MBV
9	Encanto	Sol 3718	Sol 3715-3721	-3855	646	21 janvier 2023	Gediz Vallis : MBV
10	Dinira	Sol 3742	Sol 3737-3744	-3855	646	15 février 2023	Gediz Vallis : MBV
11	Atacama	Sol 4877	Sol 4877-4889	-3570	930	26 avril 2026	Sharp : Bosworks
MBV : Marker Band Valley							

PDS Geosciences Node : https://an.rsl.wustl.edu/msl/AN/an3.aspx

Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/JV (Jan Vacek)
https://mastodon.arch-linux.cz/@JV_Honza/114676838932628785

Sol et Date pour Chaque Kilomètre						
Spirit			Opportunity		Curiosity	
km	Sol	Date	Sol	Date	Sol	Date
1	108	26-04-2004	102	07-05-2004	335	16-07-2013
2	125	10-05-2004	325	23-12-2004	365	16-08-2013
3	147	01-06-2004	393	02-03-2005	406-4	27-09-2013
4	363	11-01-2005	408	18-03-2005	436	28-10-2013
5	635	16-10-2005	428	07-04-2005	540	11-02-2014
6	715	05-01-2006	605	05-10-2005	587	01-04-2014
7	1123	02-03-2007	774	01-03-2006	655	10-06-2014
8			849	14-06-2006	670	24-06-2014
9			917	23-08-2006	735-43	31-08-2014
10			1080	06-02-2007	957	16-04-2015
11			1194	02-06-2007	1094-98	04-09-2015
12			1666	25-09-2008	1248	09-02-2016
13			1693	28-10-2008	1376	19-06-2016
14			1782	27-01-2009	1448	01-09-2016
15			1825	12-03-2009	1526	21-11-2016
16			1892	22-04-2009	1669	17-04-2017
17			1952	21-07-2009	1754	13-07-2017
18			2034	13-01-2009	1930	10-01-2018
19			2124	14-01-2010	2044	07-05-2018
20			2191	24-03-2010	2300	25-01-2019
21			2272	15-06-2010	2473	22-07-2019
22			2322	05-08-2010	2742	23-04-2020
23			2355	08-09-2010	2824	16-07-2020
24			2393	17-10-2010	3005	18-01-2021
25			2420	14-11-2010	3080	06-04-2021
26			2443	13-12-2010	3196	02-08-2021
27			2552	29-03-2011	3356	14-01-2022
28			2567	19-04-2011	3485	27-04-2022
29			2592	10-05-2011	3651	13-11-2022
30			2614	02-06-2011	3839	25-05-2023
31			2630	18-06-2011	3955	22-09-2023
32			2654	12-07-2011	4597	27-05-2024
33			2670	29-07-2011	4369	20-11-2024
34			2754	23-10-2011	4473	07-03-2025
35			3056	08-08-2012	4558	02-06-2025
36			3314	20-05-2013	4673	09-28-2025
37			3348	25-06-2013	4916	05-06-2026
38			3385	01-08-2013	5114	14-09-2026
39			3639	19-04-2014		
40			3728	20-07-2014		
41			3837	09-11-2014		
42			3926	08-02-2015		
43			4443	23-07-2016		
44			4636	07-02-2017		
45			4874	09-10-2017		

Séance de Roulement Quotidien de 100 Mètres et Plus

(Couleur : Regroupement Mensuel et record pour chaque rover)

	Spirit			Opportunity				Curiosity		
	Sol	Mètre	Date	Sol	Mètre	Date		Sol	Mètre	Date
1	125	123.7	10-05-2004	82	140.9	17-04-2004		371	109.69	22-08-2013
2	133	113.1	18-05-2004	360	153	28-01-2005		385	137.36	05-09-2013
3	134	109.5	19-05-2004	362	156.4	31-01-2005		419	121.62	10-10-2013
4				378	?	15-02-2005		569	102.55	13-03-2014
5				383	177.51	20-02-2005		644	100.66	28-05-2014
6				384	?	21-02-2005		657	117.28	12-06-2014
7				396	123.9	05-03-2005		661	135.24	16-06-2014
8				406	183.04	16-03-2005		662	129.75	17-06-2014
9				407	160.3	17-03-2005		665	135.86	20-06-2014
10				408	190.28	18-03-2005		670	110.52	25-06-2014
11			1 415.81	410	219.89	20-03-2005		671	114.79	26-06-2014
12				412	180.5	22-03-2005		751	112.04	17-09-2014
13				413	174.7	23-03-2005		960	100.10	19-04-2015
14				414	183.2	24-03-2005		2817	101.08	09-07-2020
15				433	150.6	13-04-2008		3018	103.05	01-02-2021
16				1663	151.1	27-09-2008				
17				1666	129.3	30-09-2008				
18				1673	135.4	08-10-2008				
19				1686	130.9	21-10-2008				
20				1687	127.0	22-10-2008				
21			814,99	1691	216.19	26-10-2008				
22				1693	105.4	28-10-2008				
23				1695	?	30-10-2008				
24				1737	?	12-12-2008				
25				1796	122.1	11-02-2009				
26				1797	110.4	12-02-2009				
27				1864	119.6	22-04-2009				
28				2353	110.3	06-09-2010				
29				2355	102.7	08-09-2010				
30				2358	105.4	11-09-2010				
31				2394	100.5	18-10-2010				
32				2395	100.3	19-10-2010				
33				2401	121.8	25-10-2010				
34				2403	127	27-10-2010				
35				2420	107.7	14-11-2010				
36				2424	129.4	18-11-2010				
37				2436	100.5	30-11-2010				
38				2438	102.4	02-12-2010				
39				2441	139.3	05-12-2010				
40			707,8	2442	124,1	06-12-2010				
41				2444	100.3	08-12-2010				
42				2447	141.7	11-12-2010				
43				2449	?	14-12-2010				
44				2554	118.5	01-04-2011				
45				2556	129.5	03-04-2011				
46				2560	136.3	07-04-2011				
47				2562	111.8	09-04-2011				
48			1 118,9	2569	100.2	16-04-2011				
49				2572	119.6	19-04-2011				
50				2576	133.9	23-04-2011				
51				2579	152.8	26-04-2011				
52				2583	116.3	30-04-2011				
53				2588	126.0	06-05-2011				
54				2589	128.8	07-05-2011				
55				2592	124.9	10-05-2011				
56			872,4	2593	116.6	11-05-2011				
57				2596	139.4	14-05-2011				
58				2600	108.2	18-05-2011				
59				2603	128.5	21-05-2011				
60				2614	144.4	02-06-2011				

61				2616	165.67	03-06-2011				
62				2623	161.7	11-06-2011				
63			1 031,67	2626	132.8	14-06-2011				
64				2629	145.6	17-06-2011				
65				2630	144.2	18-06-2011				
66				2635	137.3	23-06-2011				
67				2645	160.5	03-07-2011				
68				2649	140.4	08-07-2011				
69				2652	149.4	11-07-2011				
70				2658	123.9	17-07-2011				
71			1 191,6	2660	118.9	19-07-2011				
72				2661	128.5	20-07-2011				
73				2663	108,3	22-07-2011				
74				2664	142.9	23-07-2011				
75				2668	118.8	27-07-2011				
76				2674	117.3	02-08-2011				
77				2676	116.6	04-08-2011				
78				3351	119.7	28-06-2013				
79				3355	117.8	02-07-2013				
80				3385	114.7	02-08-2013				
81				3728	100.3	20-07-2014				
82				3839	110.5	11-11-2014				
83				4705	131.4	18-04-2017				

Vers Endurance — Vers Victoria — Victoria — Vers Santa Maria — Vers Endeavour — Solander Point — Cape Tribulation — Cape Byron

Curiosity : Juin 2014 il y a eut 6 roulements quotidiens totalisant 743,44 mètres (no 6 à 11 entre 7-8 km)
Curiosity : Record en marche arrière : Sol 2616
Record absolu de distance parcourus sur un seul sol : Curiosity 385, Opportunity 410 et Spirit 125

Sols 0-494 https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014JE004622
Sols 535-634 https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JE005200
Midnight Planets http://www.midnightplanets.com/contents.html
Mars Exploration Rover Opportunity End of Mission Report :
https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/47103/CL%2319-7647.pdf
Mars Exploration Rover Spirit End of Mission Report :
https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160001767/downloads/20160001767.pdf
Where is Curiosity? https://science.nasa.gov/mission/msl-curiosity/location-map/

Conjonction Solaire					
		InSight		Curiosity	
	Date	Sol	Lieu	Sol	Lieu
1	9 au 26 avril 2013			240-56	Yellowknite Bay : Cumberland
2	3 au 25 juin 2015			1004-1025	Marias Pass
3	22 juil au 1er août 2017			1763-1772	Verra Rubin Ridge
4	28 août au 10 sept 2019	268-276	Elysium Plnitia	2509-2522	Glen Torridon : Glen Etive
5	30 sept au 18 oct 2021	1019-1037	Elysium Plnitia	3253-3271	Gediz Vallis
6	11 au 25 nov 2023			4004-4018	Gediz Vallis Channel : Sequoia
7	29 déc 2025 au 20 janv 2026			4763-4784	Bosworks : Nevado Sajama
8					
9					
10					
11					

Sol et Lieux des Anniversaires				
	InSight (26 novembre 2018)		Curiosity (6 Août 2012)	
Année	Sol	Lieu	Sol	Lieu
1	355	Elysium Planitia	356	Dépassé Elsie Mountain
2	711		711	HV : Gold Ace
3	1066		1066	Marias Pass : Lion
4	1421		1422	MB : Marimba
5			1777	VRR : Mackerel Ledge
6			2133	VRR : Stoer
7			2488	GT : Glen Etive 1
8			2844	GT : Mary Anning
9			3199	GV : Nadaillac
10			3555	GV : Bolivar
11			3910	GVC : Kolpos Megaron
12			4266	GVC : Kings Canyon
13			4621	Bosworks : Repechón
14			4976	Laguna de Laja
15				
HV :	**Hidden Valley**		**GT :**	**Glen Torridon**
MB :	**Murray Buttes**		**GV :**	**Gediz Vallis**
VRR :	**Vera Rubin Ridge**		**GVC :**	**Gediz Vallis Channel**

CURIOSITY : Membres Stratigraphiques
(qui retracent des époques sédimentaires différentes)

La formation du cratère « Gale » il y a environ 3,7 milliards d'années et l'ère des phillosilicates, à l'époque ou la planète était beaucoup plus chaude et humide, était déjà terminée depuis environ 400 millions d'années. La mission a compilé des preuves convaincantes que le bassin du cratère a accumulé des sédiments transportés par des rivières marginales dans des lacs qui ont probablement persisté pendant des millions d'années il y a environ 3,6 Ga au début de l'Hespérien.

Les strates sédimentaires de la zone de terrain de la mission du rover Curiosity ont été divisées en trois groupes principaux : le groupe Bradbury, qui représente les plaines intra-cratères du bord du cratère (Aeolis Palus) ; le groupe du Mt. Sharp, qui représente les strates exposées à l'intérieur du mont Sharp (Aeolis Mons) ; et le groupe de Siccar Point, qui recouvre en discordance les strates du mont Sharp inférieur.

Trois Groupe : Bradbury (0-750) - formation Yellowknife Bay, Kimberley
Composé de dépôts fluvio-deltaïques (grès à stratifications entrecroisées fluvial, Sandstone) avec des intervalles de mudstone lacustres (environnement de bordure de lac, sédiment à grain très fin finement laminé composé d'argile et de boue).
Mount Sharp (750–2302) - formations de Murray, Caroline Shoemaker, Mirador
Composé de dépôts éoliens de grès à stratifications entrecroisées à grain grossier d'origine basaltique (témoigne d'une transition entre un environnement humide et un environnement sec) dénommé Sandstone
Siccar Point - formation Stimson
Composé de dépôts éoliens de grès basaltique plus résistants à l'érosion

Membres stratigraphiques : plateau d'Emerson (Sol 992–1154), plateau de Naukluft (Sol 1264–1386) (sommet du plateau de Naukluft Sol 1282), les buttes de Murray (Sol 1383–1455) et le pédiment de Greenheugh (Sol 2665–2734)

Groupe Mount Sharp :

- **Formation de Murray**, 7 membres : Pahrump Hills (Sols 747-1100), Hartmann's Valley (Sols 1100-1410), Karasburg (Sols 1410–1470), Sutton Island (Sols 1470–1690), Blunt's Point (Sols 1690–1800), Pettegrove Point (Sols 1810-1873, 2000–2014, 2024–2045 et 2095–2157), Jura (Sols 1874-1999, 2015-2023 et 2158-2306)
Le membre du Jura est le membre le plus élevé de la formation de Murray. Deux membres stratigraphiques, Pettegrove Point (fortes signatures spectrales d'hématite cristalline rouge) et Jura, affleurant sur la crête de Vera Rubin Ridge (VRR) (Sols 1800-2309) résistant à l'érosion, font également partie de formation de Carolyn Shoemaker, tous deux étant interprétés comme une continuation de la formation principalement.

- **Formation de Caroline Shoemaker**, 5 membres : partie supérieure de Jura (Sols 2309-2439 et 2448-2453), Knockfarril Hill (Sols 2440-2447, 2454-2606 et 2817-2950), Glasgow (Sols 2607-2695 et 2735-2816), Mercou (Sols x-x), Pontours (Sols x-x)
Glen Torridon (Sols 2309-3081) riche en argile smectite

- **Formation de Mirador**, 6 membre: Dunnideer (Sols x-x), Port Logan (Sols x-x), Contigo (Sols x-x), Catrimani (Sols x-x), Amapari (bande marqueur) (Sols x-x), Chenapau (Sols x-x). (Gediz Vallis, Gediz Vallis Channel, Bosworks).
Ce membre d'Amapari est l'expression préservée d'un lac peu profond et libre de glace.

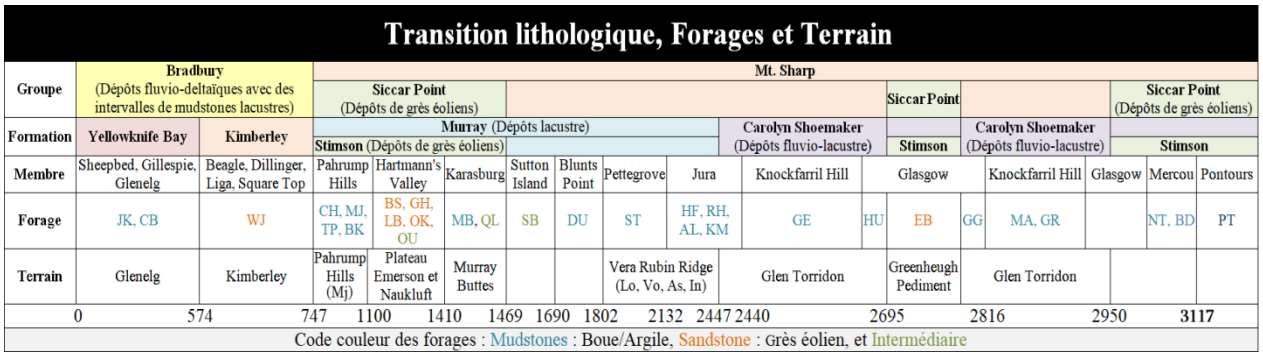
Transition lithologique de Curiosity

	Nom		Groupe			Formation	Membre	Terrain (Sol)	
1	Rocknest	RN	**Bradbury** (0-750) (les plaines intra-cratères du bord du cratère-Aeolis Palus, composé de grès et de conglomérats fluviatiles) (100 m)					(56-125)	2013
2	John Klein	JK				**Yellowknife Bay** (fluviales, deltaïques, lacustres)	Sheepbed	Glenelg (126-303)	
3	Cumberland	CB							
4	Windjana	WJ				**Kimberley** (fluviales, lacustres)	(304-747)	Kimberley (574-634)	2014
5	Confidence Hills	CH	**Mount Sharp** (les strates exposées à l'intérieur du mont Sharp-Aeolis Mons) (750–2302) 850 mètres			**Murray** (strates argileuses avec des mudstones lacustres et des grès éoliens et fluviatiles) (400 mètres)	Pahrump Hills (747-1100)	Pahrump Hills (753-923)	2015
6	Mojave 2	MJ							
7	Telegraph Peak	TP		**Siccar Point** (recouvre en discordance les strates du mont Sharp inférieur)					
8	Buckskin	BK						Plateau Emerson (990-1154)	
9	Big Sky	BS			**Stimson** (Composé de dépôts éoliens de grès basaltique plus résistants à l'érosion. l'expression préservée d'un grand champ de dunes éoliennes)		Hartmann's Valley (1100-1410)		
10	Greenhorn	GH							
11	Gobabeb	GB						Bagnold Dune (1155-1278)	
12	Lubango	LB						Plateau Naukluft (1279-1352)	2016
13	Okoruso	OK							
14	Oudam	OU							
15	Marimba	MB					Karasburg (1410-1469)	Murray Butte (1400-1469)	
16	Quela	QL							
17	Sebina	SB					Sutton Island (1469-1690)		
18	Ogunquit Beach	OG						Bagnold Dune 2 (1602-1659)	2017
19	Duluth	DU					Blunt's Point (1690-1802, 2045-2094)		2018
20	Stoer	ST					Pettegrove Point (1810-1873, 2000–2014, 2024–2045, 2095–2157)	Vera Rubin Ridge (riche en Hématite) (VRR) (1800–2447)	
21	Highfield	HF					Jura (1874-1999, 2015-2023 et 2158-2306)		
22	Rock Hall	RH							
23	Aberlady	AL				**Caroline Shoemaker** (mudstones interstratifiés et des grès à stratification entrecroisée fluvial et lacustre intermittent) (0 mètres)	Jura (2309-2439, 2448-2453)	Glen Torridon (riche en argile) (2447-2695)	2019
24	Kilmarie	KM							
25	Glen Etive 1	GE					Knockfarril Hill (2440-2447, 2454-2606)		
26	Glen Etive 2	GE 2							
27	Hutton	HU					Glasgow (2607-2695, 2735-2816)	Greenheugh Pediment (2695-2732)	2020
28	Edinburgh	EB		**Siccar Point**	**Stimson**				
29	Glasgow	GG						Glen Torridon (2817-3049)	
30	Mary Anning	MA					Knockfarril Hill (2817-2950)		
31	Mary Anning 3	MA 3							
32	Groken	GR							
33	Nontron	NT		**Siccar Point**	**Stimson**		Mercou (x-x)	Mont Mercou (3049-3117)	2021
34	Bardou	BD							
35	Pontours	PT					Pontours (x-x)	Pontours (3052-3071)	
36	Maria Gordon	MG				**Mirador** (transition argile-sulfate, unité sulfatée stratifiée) dépôts éoliens et ponctuée d'épisodes	Dunnideer (x-x)	Gediz Vallis (**3200-3576**)	
37	Zechstein	ZE					Port Logan (x-x)		

38	Avanavero	AV				humides intermittents (~340 mètres)	Contigo (fluviaux et lacustres intermittents) (x-x)		2022
39	Canaima	CA							
							Catrimani (migration de rides de vent dans des nappes de sable éoliennes) (3567-3638)		
40	Tapo Caparo	TC					Chenapau (lacustres et érosion éolienne de dépôts de nappes de sable) (x -x)	Amapari Bande de Marquage (AMB) 3575 (3669-3689, 3708-3774) (lac peu profond)	2023
41	Ubajara	UB							
42	Sequoia	SQ		**Siccar Point**	Long Valley			Gediz Vallis Channel (37**49**-4355)	
43	Mineral King	MK							2024
44	Mammoth Lake	ML							
45	Kings Canyon	KC							
46	Altadena	GR						Bosworks (4537-4848)	2025
44	Valle de la Luna	VL							
45	Nevado Sajama	NS							
46	Nevado Sajama2	NS2							2026
47	Atacama / raté	At							
48	Campo Marte	CM							

A Burial History of the Sedimentary Succession Preserved in Aeolis Mons, as Recorded by Fracture Networks at Maria Gordon Notch, Gale Crater, 28 July 2025
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2024JE008843

CURIOSITY : Membres Stratigraphiques



(RN)	Rocknest	(JK)	John Klein	(CB)	Cumberland	(WJ)	Windjana
(CH)	Confidence Hills	(MJ)	Mojave2	(TP)	Telegraph Peak	(BK)	Buckskin
(BS)	Big Sky	(GH)	Greenhorn	(ND)	Namib Dunes	(GB)	Gobabeb
(LB)	Lubango	(OK)	Okoruso	(OU)	Oudam	(MB)	Marimba
(QL)	Quela	(SB)	Sebina	(OG)	Ogunquit Beach	(DU)	Duluth
(ST)	Stoer	(HF)	Highfield	(RH)	Rock Hall	(AL)	Aberlady
(KM)	Kilmarie	(GE)	Glen Etive 1-2	(HU)	Hutton	(EB)	Edinburgh
(MA)	Mary Anning (3)	(GR)	Groken	(NT)	Nontron	(BD)	Bardou
(PT)	Pontours						

Forages échoués non représenté :

(Mj)	Mojave	(Lo)	Lake Orcadie	(Vo)	Voyageurs	(As)	Ailsa
(In)	Inverness						

*Échantillonnage de Dunes

EN PRÉPARATION :

Transition lithologique, Forages et Terrain à partir de Gediz Vallis :

(MG)	Maria Gordon	(ZE)	Zechstein	(AV)	Avanavero	(CA)	Canaima
(TC)	Tapo Caparo	(UB)	Ubajara	(SQ)	Sequoia	(MK)	Mineral King
(ML)	Mammoth Lake	(KC)	Kings Canyon	(AD)	Altadena	(VL)	Valle de la Luna
(NS)	Nevado Sajama	(NS2)	Nevado Sajama2				

Forages échoués non représenté :

(Ai)	Amapari 1-2	(Eo)	Encanto	(Da)	Dinira	(At)	Atacama

sidérite carbonate de fer $FeCO_3$

Summary of Chemistry and Mineralogy (CheMin) Samples

Abbreviation	CheMin sample	Sol(s)	Formation	Depositional environment	Mastcam spectral class
RN	Rocknest	61–93	[Soil]	Modern aeolian (inactive)	Bradbury
JK	John Klein	182	Yellowknife Bay	Ancient lacustrine	Neutral/Dusty
CB	Cumberland	279	Yellowknife Bay	Ancient lacustrine	Neutral/Dusty
WJ	Windjana	621	Kimberley	Ancient aeolian and fluvial	Windjana
CH	Confidence Hills	759	Murray	Ancient lacustrine	Confidence Hills
MJ	Mojave2	882	Murray	Ancient lacustrine	Windjana
TP	Telegraph Peak	908	Murray	Ancient lacustrine	Big Sky
BK	Buckskin	1060	Murray	Ancient lacustrine	Big Sky
BS	Big Sky	1119	Stimson	Ancient aeolian	Big Sky
GH	Greenhorn	1137	Stimson	Ancient aeolian (halo)	Neutral/Dusty
GB	Gobabeb	1224	[soil]	Modern aeolian (active)	Bagnold
LB	Lubango	1320	Stimson	Ancient aeolian (halo)	Big Sky
OK	Okoruso	1332	Stimson	Ancient aeolian	Big Sky
OU	Oudam	1361	Murray	Ancient aeolian and fluvial	Neutral/Dusty
MB	Marimba	1422	Murray	Ancient lacustrine	Marimba
QL	Quela	1464	Murray	Ancient lacustrine	Marimba
SB	Sebina	1495	Murray	Ancient lacustrine	Marimba
OG	Ogunquit Beach	1651	[soil]	Modern aeolian (active)	Mt. Sharp
DU	Duluth	2057	Murray	Ancient lacustrine	Marimba
ST	Stoer	2136	Murray	Ancient lacustrine	Marimba
HF	Highfield	2224	Murray	Ancient lacustrine	Marimba
RH	Rock Hall	2261	Murray	Ancient lacustrine	Hexriver

Abbreviation	CheMin sample	Sol(s)	Formation	Proposed depositional environment	Mastcam rock spectral class
AL	Aberlady	2,369	Murray	Lacustre	B. Some hematite and/or nontronite
KM	Kilmarie	2,384	Murray	Lacustre	B. Some hematite and/or nontronite

Abbreviation	CheMin sample	Sol(s)	Formation	Proposed depositional environment	Mastcam rock spectral class
GE1	Glen Etive	2,486	Carolyn Shoemaker	Fluvial	A. Neutral/Dusty
GE2	Glen Etive 2	2,527	Carolyn Shoemaker	Fluvial	A. Neutral/Dusty
HU	Hutton	2,669	Carolyn Shoemaker	Lacustre /lake margin	M. Flat profile w/small 1,013/937 nm ratio
EB	Edinburgh	2,713	Stimson	Ancient aeolian	E. Dark Fe- and/or Mn- oxides
GG	Glasgow	2,754	Carolyn Shoemaker	Lacustre /lake margin	C. Peak at 751 nm w/small 1,012/751 nm ratio
MA	Mary Anning	2,838	Carolyn Shoemaker	Fluvial	A. Neutral/Dusty
MA3	Mary Anning 3	2,870	Carolyn Shoemaker	Fluvial	A. Neutral/Dusty
GR	Groken	2,912	Carolyn Shoemaker	Fluvial	A. Neutral/Dusty
NT	Nontron	3,055	Carolyn Shoemaker	Fluvio-lacustrine	B. Some hematite and/or nontronite
BD	Bardou	3,094	Carolyn Shoemaker	Fluvio-lacustrine	D. Hematite-like
PT	Pontours	3,170	Carolyn Shoemaker	Fluvio-lacustrine	B. Some hematite and/or nontronite
MG	Maria Gordon	3,226	Mirador	Eolian	C. Peak at 751 nm w/small 1,012/751 nm ratio
ZE	Zechstein	3,289	Mirador	Eolian	B. Some hematite and/or nontronite
AV	Avanavero	3,509	Mirador	Eolian	B. Some hematite and/or nontronite
CA	Canaima	3,612	Mirador	Eolian	C. Peak at 751 nm w/small 1,012/751 nm ratio

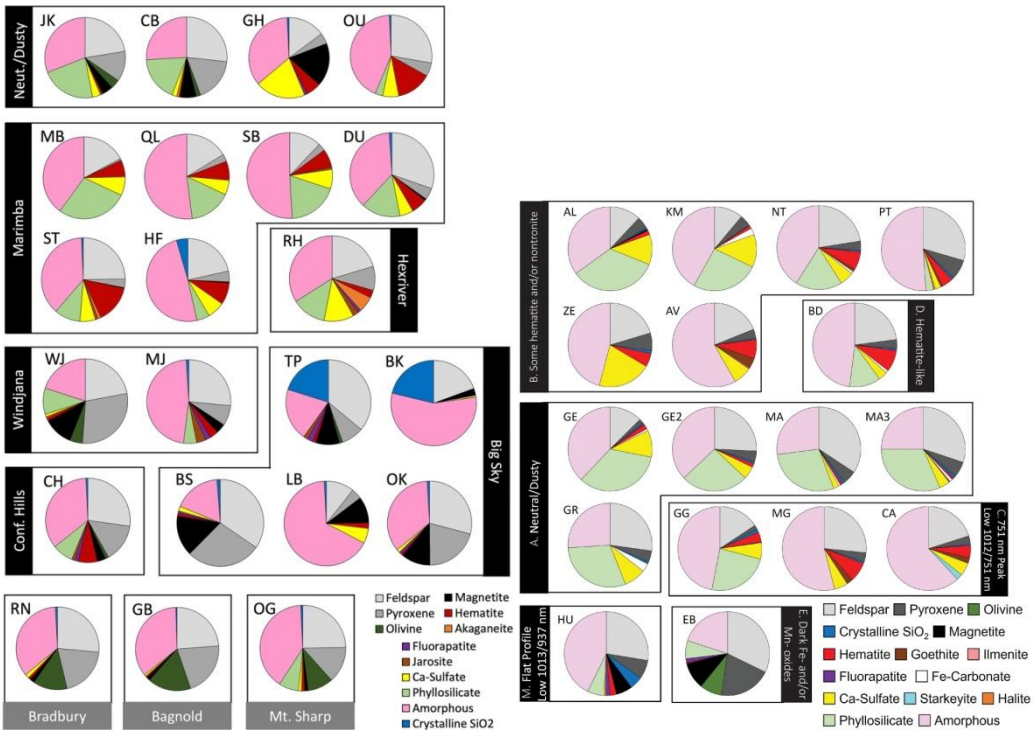
A Mastcam Multispectral Investigation of Rock Variability in Gale Crater, Mars: Implications for Alteration in the Clay-Sulfate Transition of Mount Sharp, 23 February 2024
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023JE008033

Spectral Diversity of Rocks and Soils in Mastcam Observations Along the Curiosity Rover's Traverse in Gale Crater, 08 August 2022
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021JE007134

A Review of the Phyllosilicates in Gale Crater as Detected by the CheMin Instrument on the Mars Science Laboratory, 6 August 2021
https://www.mdpi.com/2075-163X/11/8/847

Constraining the Hydration of Clay Minerals and Abundances of Amorphous Phases in Gale Crater, 30 April 2026
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2025JE009199

Mineral abundances of Chemistry and Mineralogy samples (CheMin)



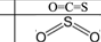
Spectral Diversity of Rocks and Soils in Mastcam Observations Along the Curiosity Rover's Traverse in Gale Crater, 08 August 2022
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021JE007134

Tableau 2. Conditions pyrolytiques SAM et abondances GCMS de chlorobenzène (C_6H_5Cl) et de 1,2-dichloropropane (DCP) ($C_3H_6Cl_2$) échantillonnés dans le piège à hydrocarbures. Coupes de température.

Échantillon (masse)	Analyse sur Mars (Sol)	Préchauffage de la tasse et de l'échantillon	Rampe de température de pyrolyse b	Piège à hydrocarbures GC coupé c	C_6H_5Cl d (pmol) BG Soustrait e	C_6H_5Cl d (pmol) Non-BG soustrait	$C_3H_6Cl_2$ d (pmol)
RN-Vierge	*86/88*	*Aucun*	*~45–875°C*	*~92–479 °C*	*<1*	*< 1*	*<2*
RN-1 (50 ± 8 mg)	*93*	*Aucun*	*~45–875°C*	*~92–479 °C*	*<2*	*8 ± 1*	*<5*
JK-Blank	177	Échantillon d'ébullition ~320°C	~320–881°C	~349–820°C	<1	2 ± 1	<3
JK-3 (portion 3X)	224	Échantillon d'ébullition ~320°C	~320–881°C	~326–581°C	<1	7 ± 1	<4
CB-Blank-1	277	Aucun	~45–875°C	~380–495°C	<1	4 ± 1	<4
CB-1	282/283	Aucun	~45–875°C	~380–495°C	<1	3 ± 1	<4
CB-2	286	Aucun	~45–875°C	~524–794°C	<1	6 ± 1	<4
CB-3 (45 ± 18 mg)	*290*	*Aucun*	*~45–875°C*	*~157–275°C*	*31 ± 6 (120 ± 23 f)*	*36 ± 7*	*26 ± 5*
CB-5 (45 ± 18 mg)	*368*	*Préchauffage de la tasse ~200°C*	*~45–875°C*	*~157–275°C*	*27 ± 5 (90 ± 17 f)*	*71 ± 13*	*14 ± 3*
CB-6 (135 ± 31 mg)	*382*	*Préchauffage de la tasse ~250°C Ébullition de l'échantillon ~250°C*	*~250–870°C*	*~272–320°C*	*30 ± 6 (180 ± 32 f)*	*74 ± 14*	*<4*
résidu CB-6	*394*	*Préchauffage de la tasse ~250°C Ébullition de l'échantillon ~250°C*	*~250–870°C*	*~272–320°C*	*<3*	*47 ± 9*	*<2*
CB-7 (3x portion)	408	Préchauffage de la tasse ~250°C Ébullition de l'échantillon ~250°C	~250–870°C	~420–784°C	<1	39 ± 7	<2
CB-Blank-2	421	Préchauffage de la tasse ~250°C Ébullition de l'échantillon ~250°C	~250–870°C	~420–784°C	<3	47 ± 9	<3
CH-Vide	*770*	*Aucun*	*~45–960°C*	*~210–960°C*	*<3*	*3 ± 1*	*<2*
CH-1 (45 ± 18 mg)	*773*	*Aucun*	*~45–960°C*	*~210–960°C*	*3*	*9 ± 2*	*<2*

https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014JE004737

Tableau. Résumé des principales molécules identifiées dans les échantillons de Glen Torridon La composition chimique inorganique et organique de sept échantillons provenant de l'unité argileuse, Kilmarie (KM), Glen Etive (GE), Mary Anning (MA), Groken (GR), Glasgow (GG), Hutton (HU) et Nontron (NT)

Chemical family	Name of the molecule	Raw chemical formula	Molecule	Sample and type of analysis										Origin(s) of the organic molecules detected in GT
				KM	GE		MA			HU	GG	GR	NT	
				Pyr	Pyr	MTBSTFA	Pyr	TMAH	MTBSTFA	Pyr	Pyr	Pyr	Pyr	
Inorganics	CO and/or N_2	CO/N_2	C≡O / N≡N	X	X	X		X		X	X			martian atmosphere
	O_2	O_2	O=O	X	X	X				X	X			
	H_2O	H_2O		X	X	X	X	X		X	X			
	NO	NO	N=O	X	X					X	X			Nitrates
	H_2S	H_2S		X	X					X	X			Sulfates, sulfides
	COS	COS	O=C=S	X	X	X				X	X			
	SO_2	SO_2		X	X		X	X	X	X	X		X sat.	
	CS_2	CS_2	S=C=S		?	X				X	X			
	CO_2	CO_2	O=C=O	X		X	X	X		X	X	X sat.		Oxidized organics and carbonates
	HCN	HCN	N-C≡N		X	X				X	X			MTBSTFA-DMF and/or indigenous
Hydrocarbons	methylpropene isomers	C_4H_8		X	X	X (1)				X (1)	X (1)			MTBSTFA
	Pentene isomers	C_5H_{10}				X (2)				X (1)	X (1)			
N-bearing organics	acetonitrile	C_2H_3N		X	X	X				X	X			MTBSTFA-DMF and/or indigenous
	methacrylonitrile	C_4H_5N				X								
	Propenenitrile (acrylonitrile)	C_3H_3N		X	X	X				X	X			
	propanenitrile	C_3H_5N			X					X	X			
	butenenitrile	C_4H_5N			X						X			
	isocyanate t-BDMS	$C_7H_{13}NOSi$				X								MTBSTFA-DMF
	isocyanomethane	C_2H_3N								X	X			
	dimethylbenzenamine	$C_8H_{11}N$						X						TMAH + organic
	trimethylbenzenamine	$C_9H_{13}N$						X						TMAH + organic
	tetramethylbenzenamine	$C_{10}H_{15}N$						X						
	benzonitrile	C_7H_5N							X			X	X	Potentially indigenous
O-bearing organics	acetone	C_3H_6O			X									MTBSTFA and/or DMF
	methylpropenal	C_4H_6O			X					X	X			MTBSTFA-DMF + minerals and/or indigenous
	methylpropanal	C_4H_8O								X	X			
	Potential oxygen-bearing aromatic	?	?								X			
	benzoic acid t-BDMS	$C_{13}H_{20}O_2Si$							X			X		Oxidized organics and/or MTBSTFA + trap(s)
	benzoic acid methyl ester	$C_8H_8O_2$						X						
Cl-bearing organics	chloromethane	CH_3Cl		X	X	X	?			X	X			MTBSTFA + chlorides or HCl
	dichloromethane	CH_2Cl_2			X		?			X	X			
	chloromethylpropane	C_4H_9Cl			X									Likely indigenous
	chloromethylpropene	C_4H_7Cl			X (1)					X	X			MTBSTFA + chlorides or HCl
	chlorobenzene	C_6H_5Cl			(X)		(X)			?	X			Likely indigenous
	chlorodimethylethylsilane	$C_4H_{11}ClSi$		X	X					X	X			MTBSTFA + chlorides or HCl
S-bearing organics	ethanethiol	C_2H_6S		(X)	X	X	?			X	X			Likely indigenous
	thiophene	C_4H_4S		(X)	X	X	?			X	X			
	dithiapentane	$C_3H_8S_2$			?		X			?	X			
	dithiolane	$C_3H_6S_2$					X				X			Likely indigenous
	trithiane	$C_3H_6S_3$					X				?			
	benzothiophene	C_8H_6S						X						
	alkyl-thiophene	?	?					X						
	propanethiol	C_3H_8S									X			
	methylthiophene	C_5H_6S									X			

Aromatics	benzene	C_6H_6		X	X	X		X		X	X			Trap(s)
	toluene	C_7H_8		X	X	X		X		X	X			
	phenol t-BDMS	$C_{12}H_{20}OSi$		X	X	X			X	X		X	X	Trap(s) + MTBSTFA
	phenol	C_6H_6O		X	X					X				Trap(s)
	xylene	C_8H_{10}									X			
	phenylethyne	C_8H_6			X	X				X	X			
	styrene	C_8H_8		X	X	X				X	X			
	biphenyl	$C_{12}H_{10}$		X	X				X	X	X	X		
	diphenylmethane or methylbiphenyl	$C_{13}H_{12}$						X	X					
	methylindene	$C_{10}H_{10}$						?						Trap(s) and/or indigenous
	phthalic acid t-BDMS	$C_{20}H_{34}O_4Si_2$							X			X		Trap(s) + MTBSTFA
	naphthalene	$C_{10}H_8$						X	?			?		Potentially indigenous
	fluoronaphthalene (IS)	$C_{10}H_7F$						?	?			?	?	SAM Internal standard
	tetramethylbenzene	$C_{10}H_{14}$						X						Trap(s) and/or indigenous
	dihydronaphthalene	$C_{10}H_{10}$						?						
	methylnaphthalene	$C_{11}H_{10}$						X (1)						Likely indigenous
Others	mono-silylated water (MSW)	$C_6H_{16}OSi$		X	X	X	X			X	X			MTBSTFA + H_2O
	bi-silylated water (BSW)	$C_{12}H_{30}OSi_2$		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	t-butyldimethylfluorosilane	$C_6H_{15}FSi$		X	X	X				X	X		X	MTBSTFA byproduct
	trifluoromethylacetamide (TFMA)	$C_3H_4F_3NO$		X	X	X			X		X	X		
	boric acid 3-TMS	$C_9H_{27}BO_3Si_3$						X	X			X	X	MTBSTFA + silica beads
	dimethyltrifluoroacetamide	$C_4H_6F_3NO$			X					X	X			MTBSTFA byproduct
	MTBSTFA (unreacted)	$C_9H_{18}F_3NOSi$				X								MTBSTFA
	DMF (unreacted)	C_3H_7NO				X	?							DMF

Au sein de la formation Murray, l'échantillon Kilmarie (KM) a été prélevé dans le membre Jura ; au sein de la formation Carolyn Shoemaker, les échantillons Glen Etive (GE), Mary Anning (MA) et Groken (GR) ont été forés dans le membre Knockfarril Hill (KHm) ; et les échantillons Glasgow (GG), Hutton (HU) et Nontron (NT) proviennent du membre Glasgow (Gm)

Millan, M. et al. Sedimentary organics in Glen Torridon, Gale Crater, Mars: results from the SAM Instrument Suite and Supporting Laboratory analyses. J. Geophys. Res. Planets 127, e2021JE007107 (2022) https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021JE007107

Chronologie des principales expériences SAM (expériences EGA et GC-MS)

Depuis 2012, Curiosity a effectué des dizaines d'analyses EGA. Voici les sites et échantillons les plus emblématiques répertoriés par la NASA : SAM peut analyser les molécules organiques libérées lors de la pyrolyse selon trois modes : EGA, EGA couplée à la GC-MS et analyse par voie humide avec EGA et GC-MS. Lors de l'EGA, les composés volatils dégagés lors de la pyrolyse des échantillons solides sont directement envoyés au spectromètre de masse (MS) pour détection. Pyrolyse pure, thermochimiolyse TMAH (hydrolyse et méthylation assistées thermiquement) et dérivatisation MTBSTFA.

Formation géologique	Membre géologique	Cible (Échantillon)	Intervalle Sol	Forage Sol	Analyse SAM Sol	Principaux gaz et minéraux détectés
		Rocknest (56-125)	84 - 94	93 (Eolian)	93-96-99-117	Premier sable éolien analysé et première détection confirmée de molécules organiques simples comme le chloroforme ($CHCl_3$) le chlorométhane (CH_3Cl) et le dichlorométhane ($C_2H_2Cl_2$)
Yellowknife Bay (126-303) (fluviales, deltaïques, lacustres)	Sheepbed (Mudstone / boue argileuse) (126-303)	John Klein Glenelg (126-303)	162-272	182 (Lacustre)	196-198-224-227	Première détection de minéraux argileux (smectites $A_{0.3}D_{2.3}[T_4O_{10}]Z_2 * nH_2O$) première confirmation, nitrates, sulfates (SO_4). Première preuve d'habitabilité. **A confirmer** : sulfates de calcium ($CaSO_4$) première confirmation
		Cumberland Glenelg (126-303)	272-96	279 (Lacustre)	(282–283)-286-290-368-(382-394)-408	Première détection confirmée de molécules organiques comme les hydrocarbures aromatiques benzène (C_6H_6) et le toluène (C_7H_8), et des molécules organique soufrée comme le diméthylsulfure (CH_3SCH_3) (thioéther), des hydrocarbures chlorés comme le chlorobenzène (C_6H_5Cl) et le 1,2-dichloropropane ($C_3H_6Cl_2$), et de longue chaine alkanes; decane ($C_{10}H_{22}$), undecane ($C_{11}H_{24}$) et dodecane ($C_{12}H_{26}$), supposés provenir d'acides gras décarboxylés Première détection des traces de halite (sel de table, NaCl) première confirmation
Kimberley (304-747) (fluviales, lacustres)	Kimberley (304-747)	Windjana Kimberley (574-634)	609-29	621 (Fluvio- Eolian)	624	riche en un minéral la sanidine première confirmation un feldspath potassique $K(AlSi_3O_8)$
Murray (747-2447) (mudstones lacustres, des grès éoliens et fluviaux) (400 mètres)	Pahrump Hills (747-1100) (14 mètres)	Confidence Hills Pahrump Hills (753-923)	753-79	759 (Lacustre)	773	Premier échantillon de la formation Murray (base du Mont Sharp). Analyse de plusieurs couches de boue sédimentaire et première confirmation de composés organique thiophéniques (contenant du soufre) comme des thiophènes (C_4H_4S), méthylthiophène (C_5H_6S), méthanthiol (CH_3SH) (thiol) et le diméthylthiophène (C_6H_8S) première confirmation pour les 4 molécules Dans les conditions très sèches de Gale (et à l'intérieur du rover), l'epsomite tend à se déshydrater pour devenir de la starkeyite. **A confirmer :** epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) première confirmation sulfate de magnésium starkeyite ($MgSO_4 * 4HO_2$) première confirmation
		Mojave 2 Pahrump Hills (753-923)	864-95	882 (Lacustre)	887	Deuxième détection de thiophènes (C_4H_4S) : molécules cycliques très stables, de méthanthiol (CH_3SH) (thiol) et de diméthylsulfure (CH_3SCH_3) (thioéther)
		Telegraph Peak Pahrump Hills (753-923)	903-22	908 (Lacustre)	928	Transition vers un environnement plus riche en silice
		Buckskin Plateau Emerson (990-1154)	1056-66	1060 (Lacustre)	107**6**	(Marias Pass) Tridymte (SiO_2) première confirmation cristalline, minéral de la famille de la silice (indique une activité volcanique siliceuse)
	Hartmann's Valley (1100-1410)	Big Sky Plateau Emerson (990-1154)	1112-26	1119 (Eolian)	1130	(Bridger Basin) Grès anciens de la formation Stimson un composé de fragments de roches volcaniques (basalte) classiques du cratère Gale.
		Greenhorn Plateau Emerson (990-1154)	1127-43	1137 (Eolian)	1147-1178	(Bridger Basin) pics massifs de sulfates (SO_4), dioxyde de soufre (SO_2)
		Gobabeb Bagnold Dunes (1155-1278)	1221–1243	1224–1228–1231 (Eolian)	1224–1237	(Namib Dunes) Sable basaltique
		Lubango Plateau Naukluft (1279-1352)	1317-28	1320 (Eolian)	1320	Les analyses ont confirmé une concentration de silic (SiO_4) exceptionnellement élevée

		Okoruso Plateau Naukluft (1279-1352)	1329-43	1332 (Eolian)	**1344**	Grès anciens de la formation Stimson une signature typique d'une roche riche en minéraux sulfatés (SO_4) L'expérience a servi de référence "témoin" pour comprendre l'altération extrême observée a Lubango
		Oudam	1357-69	1361 (Eolian)	1382	Dominé par des sulfates de calcium ($CaSO_4$). Conditions passant d'un lac profond à des dépôts de rivières ou de courants plus actifs.
	Karasburg (1410-1469)	Marimba Murray Butte (1400-1469)	1417-27	1422 (Lacustre)	1442	roche moins riche en minéraux hydratés
		Quela Murray Butte (1400-1469)	1457-67	1464 (Lacustre)	1466	retour d'une forte concentration en sulfates de magnésium ($MgSO_4$)
	Sutton Island (1469-1690)	Sebina	1489-98	1495 (Lacustre)	1496	confirmé une transition vers un milieu riche en hématite (Fe_2O_3)
		Ogunquit Beach Bagnold Dunes 2 (1602-1659)	1602-1659	1651 (Eolian)	1909	Première expérience de Chimie humide 1 sur 9 (MTBSTFA/DMF 1 sur 7). dérivatisation, c'est-à-dire qu'elles réagissent d'abord avec d'autres produits chimiques pour devenir plus volatiles, un sable basaltique "frais"
	Blunt's Point (1690-1802, 2045-2094)	Duluth	2053-85	2057 (Lacustre)	2059	Ce fut le premier forage réussi en plus de 18 mois, utilisant une nouvelle méthode ou algorithme de forage appelée Feed Extended Drilling (FED), mise au point après une panne du mécanisme de forage en décembre 2016. Contrairement à d'autres sites, Duluth n'a pas montré de traces significatives d'oxychlorines (perchlorates)
	Pettegrove Point (1810-1873, 2000–2014, 2024–2045, 2095–2157)	Stoer Vera Rubin Ridge (1900–2447)	2132-55	2136 (Lacustre)	2147	zones riches en oxydes de fer Hématite rouge (Fe_2O_3) (fer ferrique) et minéraux argileux
	Jura (1874-1999, 2015-2023 et 2158-2306)	Highfield Vera Rubin Ridge (1900–2447)	2222-49	2224 (Lacustre)	2231	confirmant la présence de phyllosilicates (argiles) de couleur grise (fer ferreux) de type smectites ($A_{0.3}D_{2-3}[T_4O_{10}]Z_2 * nH_2O$) et présence de carbonates de fer (lessivage des perchlorates)
		Rock Hall Vera Rubin Ridge (1900–2447)	2257-95	2261 (Lacustre)	2281	riche en hématite cristalline (Fe_2O_3) (fer ferrique) de couleur rouge (précipitation d'hématite) Contrairement à Highfield, Rock Hall a libéré de l'oxygène, confirmant la présence de sels de chlore oxydants (perchlorates)
Caroline Shoemaker (2309--x) (fluvial et lacustre intermittent de plus haute énergie) (0 mètres)	Jura (2309-2439, 2448-2453)	Aberlady Glen Torridon (2447-2695)	2365-80	2370 (Lacustre)		Aberlady a prouvé que Glen Torridon était le fond d'un ancien lac d'eau douce au pH neutre, persistant assez longtemps pour former d'épaisses couches d'argiles.
		Kilmarie Glen Torridon (2447-2695)	2381-2408	2384 (Lacustre)	2393-2398	Haute teneur en argile (Smectites) SAM a confirmé la présence de benzène (C_6H_6), de toluène (C_7H_8), de thiophènes (C_4H_4S) et de fragments de molécules soufrées plus complexes comme le méthylthiophène (C_5H_6S), et du carbonate de fer (Sidérite ($FeCO_3$) première confirmation)
	Knockfarril Hill (2440-2447, 2454-2606)	Glen Etive 1 Glen Torridon (2447-2695)	2484-2524	2486 (Fluvial)		(Glen Etive 1), Plus forte concentration d'argiles et a été une étape préparatoire cruciale avant l'expérience de chimie humide a Glen Etive 2. Détection d'hydrocarbures aromatiques : benzène (C_6H_6) et toluène (C_7H_8), et des composés soufrés : thiophènes (C_4H_4S) et diméthylsulfure (CH_3SCH_3) Glen Etive 1 a servi de "témoin". En comparant ses résultats avec ceux de Glen Etive 2 (où un réactif chimique a été ajouté), les scientifiques ont pu identifier quelles molécules étaient natives de Mars et lesquelles résultaient des réactions chimiques à l'intérieur du four.
		Glen Etive 2 Glen Torridon (2447-2695)	2525-55	2527 (Fluvial)	2540–2542	(Glen Etive 2), Analyse chimique par voie humide 2 sur 9 (MBSTFTA/DMF 2 sur 7). Plus forte concentration d'argiles et la plus grande diversité de molécules organiques complexes (soufrées, azotées) de la famille des acides carboxyliques aromatiques comme l'acide benzoïque ($C_7H_6O_2$) première confirmation. Dérivés aromatiques : signaux très nets de benzène (C_6H_6), de toluène (C_7H_8) et de molécules azotées ont été enregistrés.
	Glasgow (2607-2695, 2735-2816)	Hutton Glen Torridon (2447-2695)	2664-90	2668 (Lacustre)	2682	(base de la butte "Central Butte") L'EGA a révélé une composition complexe, montrant que Hutton est différent des argiles pures de Glen Torridon et confirmant la présence de smectites ferriques (argiles), et de composés organiques soufrés
		Edinburgh Greenheugh	2702-28	2711 (Eolian)	2721	présence de nontronite (smectite riche en fer). SAM a détecté des pics correspondant à des sulfates de magnésium ($MgSO_4$) et de fer ($FeSO_4$).

		Pediment (2695-2732)				Ces sels témoignent de phases d'évaporation ou d'interactions avec des fluides salins.
		Glasgow Glen Torridon (2817-3049)	2747-79	2754 (Lacustre)	2765–2771	Analyse de la transition entre les zones riches en argile et les zones riches en sulfates (SO_4). Hydrocarbures chlorés : comme le chlorométhane (CH_3Cl) et le chloroforme ($CHCl_3$)
	Knockfarril Hill (2817-2950)	Mary Anning 1 Glen Torridon (2817-3049)	2829-54	2838 (Fluvial)	2850	Avant d'utiliser les précieuses capsules de chimie humide TMAH (pour Mary Anning 3), la NASA a effectuée une EGA standard sur le premier échantillon (Mary Anning 1)
		Mary Anning 3 Glen Torridon (2817-3049)	2866-2904	2870 (Fluvial)	2878-2885	Premier échantillon de chimie humide TMAH Sol 2878. Analyse chimique par voie humide 3 sur 9 (TMAH 1 sur 2) et troisième analyse chimique par voie humide 4 sur 9 (MBSTFTA/DMF 3 sur 7) Sol 2885. et de la Sidérite ($FeCO_3$) (carbonate de fer) Détection de plus de 20 molécules organiques aromatiques et cycliques dans des grès argileux du membre Knockfarrill Hill de Glen Torridon. triméthylbenzène (C_9H_{12}), tétraméthylbenzène ($C_{10}H_{14}$), diméthylsilanediol dérivé, naphtalène ($C_{10}H_8$) [première confirmation], benzoate de méthyle ($C_8H_8O_2$) [acide carboxylique], dihydronaphtalène ($C_{10}H_{10}$), méthylnaphtalène ($C_{11}H_{10}$), diphénylméthane ($C_{13}H_{12}$), l'étalon de récupération 1-fluoronaphtalène ($C_{10}H_7F$), (soufrés) le trithiane ($CH_2S)_3$, dithiapentane ($C_3H_8S_2$), dithiolane ($C_3H_6S_2$) et le benzothiophène ($C_6H_4C_2H_2S$) [première confirmation]
		Groken Glen Torridon (2817-3049)	2904-22	2910 (Fluvial)	2918	Détection d'hydrocarbures aromatiques benzène (C_6H_6) et le toluène (C_7H_8), la présence de smectite ferriques (argiles) et de la Sidérite ($FeCO_3$) (carbonate de fer), et des composés organiques thiophéniques (contenant du soufre) comme le thiophène (C_4H_4S) et le benzothiophène ($C_6H_4C_2H_2S$)
	Mercou (x-x)	Nontron Mont Mercou (3049-3117)	3052-71	3056 (Fluvio-Lacustre)	3067	observe une augmentation des signaux de soufre par rapport au cœur de Glen Torridon, signalant que le rover quittait l'environnement de lac d'eau douce riche en argile pour des conditions plus salines riche en sulfates. Des pics correspondant aux sulfates de magnésium ($MgSO_4$) et de fer ($FeSO_4$) ont été identifiés. Détection d'hydrocarbures aromatiques benzène (C_6H_6) et le toluène (C_7H_8)
		Bardou Mont Mercou (3049-3117)	3088-3108	3094 (Fluvio-Lacustre)	3098	sommet de la falaise du Mont Mercou. Présence de nontronite (smectite riche en fer) et de la Sidérite ($FeCO_3$) (carbonate de fer)
	Pontours (x-x)	Pontours	3163-82	3170 (Fluvio-Lacustre)	3176	Présence de phyllosilicates (argiles) ferriques résiduels et apparition des sulfates de magnésium ($MgSO_4$) et de fer ($FeSO_4$) signature caractéristique d'un milieu où les sels se sont concentrés par évaporation, marquant le passage d'un lac d'eau douce à un environnement plus salin et aride. L'analyse a révélé Confirmation et identification des traces de halite (sel de table, NaCl) [première confirmation]. (sous forme cristalline) L'expérience à Pontours est cruciale car elle documente le changement climatique majeur de Mars : le passage d'un monde potentiellement habitable avec de grands lacs à un désert glacé.
Mirador (x-x) (transition argile-sulfate) dépôts éoliens et ponctuée d'épisodes humides intermittents (140 mètres)	Dunnideer (x-x)	Maria Gordon Gediz Vallis (3200-3576)	3222-46	3229 (Eolian)	3240	Le forage a été effectué au pied d'une falaise spectaculaire appelée "Maria Gordon Notch". apparition plus forte des sulfates de magnésium ($MgSO_4$) et de fer ($FeSO_4$). Les sulfates de calcium, initialement trouvés sous forme de veines, commencent à apparaître massivement comme composants principaux de la roche. Cette transition marque l'assèchement progressif de Mars : les lacs permanents ont laissé place à des épisodes d'inondations suivis d'évaporations intenses.
	Port Logan (x-x)	Zechstein Gediz Vallis (3200-3576)	3286-3312	3289 (Eolian)	3302	Absence de Phyllosilicates et de carbonate de fer. Dominance des sulfates de calcium ($CaSO_4$) très stable et une concentration exceptionnelle d'environ 25 % en poids de gypse ($CaSO_4 * 2HO_2$). Ce résultat confirme que le rover a quitté l'ancien environnement lacustre doux de Glen Torridon pour entrer dans une ère beaucoup plus aride, où l'eau ne faisait que s'évaporer en laissant des dépôts de sel.
	Contigo (lacustres et fluviaux intermittents) (x-x)	Avanavero Gediz Vallis (3200-3576)	3510-30	3512 (Eolian)	3528	(unité sulfatée) L'EGA a montré un mélange de signatures chimiques de type évaporite, confirmant que le rover quittait définitivement l'ancien lac d'eau douce représente le passage dans l'unité riche en sulfates de calcium ($CaSO_4$) et de magnésium comme l'epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) Dans les conditions très sèches de Gale (et à l'intérieur du rover), l'epsomite tend à se déshydrater pour devenir de la starkeyite.
		Canaima Gediz Vallis	3602-28	3612 (Eolian)	**3617**	(unité sulfatée) Il se situe dans la zone de transition juste avant l'unité sulfatée massive, dans une région où les roches présentaient une texture

		(3200-3576)				très résistante, forçant l'équipe à modifier les paramètres de forage. Confirmation et identification du minéral de sulfate de magnésium cristalline starkeyite ($MgSO_4 * 4HO_2$). C'est sur le site de Canaima que l'identification a atteint son plus haut niveau de certitude grâce à la synergie entre SAM et CheMin (cristalline). Ce minéral est un excellent indicateur des conditions environnementales passées, car sa formation dépend étroitement des changements de température et d'humidité lors de l'évaporation d'anciennes saumures martiennes.
	Chenapau (nappes de sable éoliennes) (x-x)	Tapo Caparo Amapari Bande de Marquage (AMB) (3669-3689, 3708-3774) (lac peu profond)	3750-71	3752 (Lacustre-Eolian)	**3760-3766**	Sidérite ($FeCO_3$) (un carbonate de fer) eaux souterraines les sels d'oxychlorine (perchlorates) et les nitrates sont quasiment inexistants
		Ubajara Gediz Vallis Channel (3749-4355)	3815-39	3823 (Lacustre- Eolian)	3830	Sidérite ($FeCO_3$) (un carbonate de fer) eaux souterraines les sels d'oxychlorine (perchlorates) et les nitrates sont quasiment inexistants
		Sequoia Gediz Vallis Channel (3749-4355)	3974-4028	3980 (Fluvio-Lacustre - Eolian)	3989–3995	Sidérite ($FeCO_3$) (un carbonate de fer) eaux souterraines
		Mineral King Gediz Vallis Channel (3749-4355)	4102-28	4107 (Fluvio-Lacustre - Eolian)	**4114–4115**	Abondance élevée : La Sidérite ($FeCO_3$) (un carbonate de fer) a été détectée dans des proportions allant jusqu'à 10,5 % en masse.
		Mammoth Lake Gediz Vallis Channel (3749-4355)	4200-37	4219 (Fluvio-Lacustre - Eolian)	4226–4228–4229	Ce site est unique car il se situe sur une crête formée par d'anciennes coulées de débris ou des inondations massives, offrant un aperçu des changements climatiques tardifs de Mars.
		Kings Canyon Gediz Vallis Channel (3749-4355)	4255-82	4263 ()	4275–4277 ()	Les données du second sous-échantillon de King's Canyon (KC) ne sont pas montrées en raison d'une anomalie du four qui a compliqué l'interprétation des résultats.
		Altadena Bosworks (4537-4848)	4564-71	4564 ()	4565	L'échantillon a été prélevé dans la formation de l'Altadena Member, une zone caractérisée par des structures en "boxwork" (crêtes minérales entrecroisées formant des polygones).
		Valle de la Luna Bosworks (4537-4848)	4687-4709	4693 ()	4695-4696-4701	
		Nevado Sajama Bosworks (4537-4848)	4711-40	4718 ()	4723–4730	densité exceptionnelle de minéraux argileux
		Nevado Sajama2 Bosworks (4537-4848)	4789-4805	4795 ()	4798	Analyse chimique par voie humide 5 sur 9 (TMAH 2 sur 2) Sol 4798, dernière expérience de chimie humide TMAH. Valle de la Luna, Nevado Sajama, Nevado Sajama2

Rover Curiosity expérience SAM-EGA
sur quel Sol a été effectué l'expérience EGA

1- Diverse organic molecules on Mars revealed by the first SAM TMAH experiment: 21 April 2026
https://www.nature.com/articles/s41467-026-70656-0

2- Space Science Reviews, The Sample Analysis at Mars Investigation and Instrument Suite, 27 April 2012
https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-012-9879-z

3- Freissinet, C. et al. Organic molecules in the Sheepbed Mudstone, Gale Crater, Mars. *J. Geophys. Res.* **120**, 495–514 (2015)
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014JE004737

4- Szopa, C. et al. First detections of dichlorobenzene isomers and trichloromethylpropane from organic matter indigenous to Mars Mudstone in Gale Crater, Mars: Results from the sample analysis at Mars instrument onboard the curiosity rover. Astrobiology 20, 292–306 (2020)
https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1089/ast.2018.1908

5- Eigenbrode, J. L. et al. Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars. Science 360, 1096–1101 (2018)
https://authors.library.caltech.edu/records/d4khq-jq713

6- Millan, M. et al. Sedimentary organics in Glen Torridon, Gale Crater, Mars: results from the SAM Instrument Suite and Supporting Laboratory analyses. J. Geophys. Res. Planets 127, e2021JE007107 (2022)
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021JE007107

7- Millan, M. et al. Organic molecules revealed in Mars's Bagnold Dunes by Curiosity's derivatization experiment. Nat. Astron. 6, 129–140 (2022)
https://www.nature.com/articles/s41550-021-01507-9

8- Freissinet, C. et al. Long-chain alkanes preserved in a Martian mudstone. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 122, e2420580122 (2025)
https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2420580122

9- A Record of Arid Surface Conditions and Aqueous Alteration in the Layered Sulfate-Bearing Unit and Marker Band Valley as Revealed by the Sample Analysis at Mars-Evolved Gas Analyzer Instrument. March 2025
https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2025/pdf/2269.pdf

CheMin du MSL a détecté des minéraux argileux dans la quasi-totalité des échantillons des groupes de Bradbury et du mont Sharp. Les smectites préservent également la matière organique plus efficacement et plus longtemps que les autres minéraux argileux. La nontronite peut avoir une capacité de préservation organique et une longévité supérieures à celles des autres smectites. Les données EGA de dégagement d'eau issues de SAM complètent les données CheMin et peuvent également servir à distinguer les types d'argiles smectites présentes dans une cible de forage en fonction de la température de dégagement d'eau

phyllosilicate argileux	Smectite group	
Saponite	$Ca_{0.25}(Mg,Fe)_3((Si,Al)_4O_{10})(OH)_2 \cdot n(H_2O)$	trioctaédriques (talc)
nontronite	$Na_{0.3}Fe^{III}{}_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot n\ H_2O$	dioctahédriques
Montmorillonite	$(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$	dioctahédriques

La composante amorphe (telles que l'opale $SiO_2 \cdot n\ H_2O$) aux rayons X, omniprésente dans les échantillons du cratère Gale (20 à 56 % en poids de tous les échantillons des groupes de Bradbury et du mont Sharp. Composante amorphe riche en silice présente dans la région de Pahrump Hills-Marias Pass.

La matière organique a été identifiée dans tous les échantillons de forage MSL par l'instrument d'analyse d'échantillons sur Mars (SAM)

ANNEXE InSight

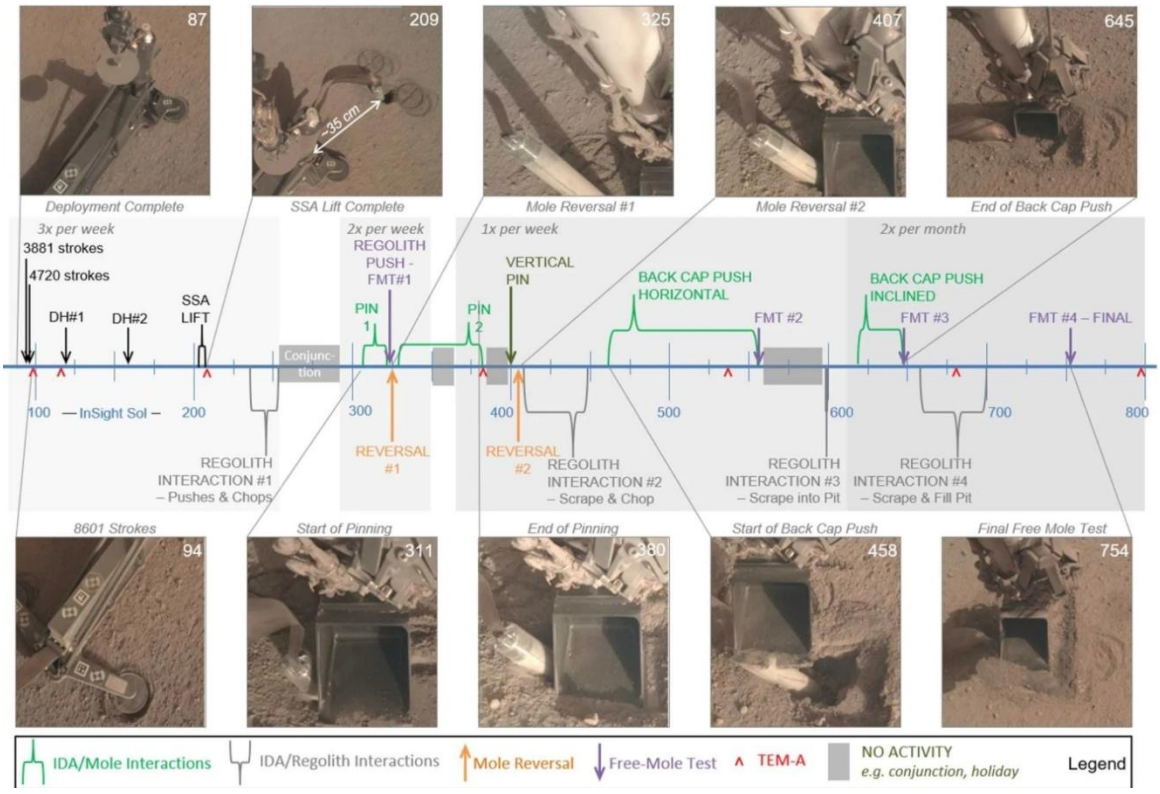
Les Principaux Séismes Détectés par le Sismomètre SEIS						
Id	**Origin Time (UTC*)**	**Origin Time (LMST)**	**Latitude**	**Longitude**	**Status**	**Magnitude**
1222a	2022-05-04T23:23:07	Sol 1222a 03:50:09	-7.63	170.67	Marsquake	5,0
1197a	2022-04-09T22:05:52	Sol 1197a 18:38:09	-	-	Marsquake	
1160a	2022-03-02		5.12	134.88	Impact	1,5
1133c	2022-02-03T08:04:36	Sol 1133c 22:47:20	3.89	165.89	Marsquake	
1102a	2022-01-02T04:27:10	Sol 1102a 15:45:01	25.22	61.96	Marsquake	
BB-1094b	2021-12-24T22:38:03	Sol 1094b 15:13:28	44.32	-173.54	Impact	4,0
1048d	2021-11-07T22:00:14	Sol 1048d 20:47:30	-1.10	165.31	Marsquake	
1034a	2021-10-23		3.92	135.05	Impact	3,0
1022a	2021-10-11T23:14:29	Sol 1022a 15:20:01	17.38	164.11	Marsquake	
1015f	2021-10-04T04:52:29	Sol 1015f 01:57:12	2.61	163.10	Marsquake	
BB-1000a	2021-09-18T17:45:08	Sol 1000a 00:45:38	38.11	-79.88	Impact	4,1
986c	2021-09-05T05:18:58	Sol 986c 02:37:30	~4	~137	Impact	2,1
981c	2021-08-31		~0.4	~135.7	Impact	1,6
976b	2021-08-25T16:50:18	Sol 976b 15:16:57	-	-	Marsquake	4,2
976a	2021-08-25T03:32:20	Sol 976a 02:20:28	-9.84	-77.98	-	4,2
864a	2021-05-02T00:57:46	Sol 864 01:40:38	0.71	163.25	Marsquake	
LF-820a	2021-03-18T14:51:38	Sol 820 20:05:58	4.90	165.01	Marsquake	3.3
LF-809a	2021-03-07T11:09:33	Sol 809 23:33:38	5.39	164.65	Marsquake	3.3
802a	2021-02-28T06:07:26	Sol 802 23:09:18	17.23	162.35	Marsquake	
793a	2021-02-18T06:07:26	Sol 793 23:09:18	~4.8	~134.1	Impact	1,4
BB-784a	2021-02-09T12:11:37	Sol 784 17:16			Marsquake	3,3
553a	2020-05-27		135,62	8,63	Impact	2,3
BB-484b	2020-04-07T08:48:32				Marsquake	2,9
LF-409d	2020-01-21T11:30:42				Marsquake	3,2
LF-407a	2020-01-19T09:54:08				Marsquake	3,0
LF-325a	2019-10-26T06:58:55				Marsquake	3,7
290b	2019-09-21T03:15:42	Sol 290 22:08:00	14.49	163.38	Marsquake	
BB-235b	2019-07-26T12:16:15	Sol 235 19:30:12	10.99	160.95	Marsquake	3.3
183a	2019-06-03T02:21:55	Sol 183 19:53:46	15.29	-179.06	Marsquake	
LF-173a	2019-05-23T02:19:33	Sol 173 02:55:15	3.45	164.68	Marsquake	3.7
128a	2019-04-07T09:31:52	Sol 128 15:28:18	-	-	Marsquake	2,1

A = localisation et B sans polarité de localisation
Ligne bleu : Cerberus Fossae & Grjotá Valles Ligne orange : Impact (8 détectés jusqu'en 2023)
*UTC: Coordinated Universal Time (Earth time)
*LMST: Local Mean Solar Time (Mars time)
LF – Basse Fréquence, SEIS VBB < 2,4 Hz BB – (Large Band) Haute Fréquence, SEIS SP > 2,4 Hz

Liste des Séisme : https://insight.oca.eu/fr/data-insight Map : https://namazu.unice.fr/marsview/
Mars InSight Events : http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/tools/mars-events/
The marsquake catalogue from InSight, sols 0–1011
En bas voir : Données supplémentaires Téléchargez tous les fichiers supplémentaires inclus avec cet article
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920122001042#bb0070

Événements sismiques InSight comme étant des impacts								
Event Designator	**S0533a**	**S0793a**	**S0981c**	**S0986c**	**S1000a**	**S1034a**	**S1094b**	**S1160a**
Event type	VF	VF	VF	VF	BB	VF	BB	VF
Chirp	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
Date	2020-05-27	2021-02-18	2021-08-31	2021-09-5	2021-11-18	2021-10-23	2021-12-24	2022-03-2
Magnitude *MW*	2.3	1.4	1.6	1.2	4.1	3.0	4.0	1.5
°N Lat (estimated)	8.63	4.74	−0.04	3.93	26.98	3.92	41.21	5.12
°E Lon (estimated)	135.62	134.22	135.62	136.96	257.86	135.05	188.49	134.88
Date of prior image	2019-04-17	2020-12-03	2018-03-25	2021-04-2	2021-09-17	2021-09-24	2021-12-24	2022-02-26
Date of after image	2021-07-31	2021-01-10	2021-12-28	2021-11-30	2021-09-19	2021-12-28	2021-12-25	2022-09-24
Constraining imager	CTX	CTX	CTX	CTX	MARCI	CTX	MARCI	CTX
°N lat (actual)	9.382	4.606	0.397	3.974	38.107	3.866	35.109	5.099
°E lon (actual)	135.377	134.087	135.689	136.963	280.128	135.107	189.829	134.807
Distance (km)	286	91	241	85	7476	48	3462	60
Crater (Eff) Diam (m)	11.9 (cluster)	3.9 (single)	7.24 (single)	6.1 (cluster)	~140 (cluster)	9.2 (single)	~150 (single)	3.2 (cluster)
HiRISE obs ID	ESP_ 070864_1895 a	ESP_ 070073_1845 b	ESP_ 072644_1805 c	ESP_ 072222_1840 d	ESP_ 073522_2185 e	ESP_ 074701_1840 f	ESP_ 073077_2155 g	ESP_ 076877_1850 h
Reference	Garcia et al. (2022)	Garcia et al. (2022)	Garcia et al. (2022)	Garcia et al. (2022)	Posiolova et al. (2022)	Ref	Posiolova et al. (2022)	Ref

Signaux chirp et événements sismiques à très haute fréquence présents avec des gazouillis (ondes infrasons/acoustiques dispersées)
Ref :
https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/ace9b4#:~:text=The%20new%20two%20impact%20seismic,on%20Mars%20(Daubar%20et%20al



La Saga de la Taupe sur Mars		
Phase	**Sols**	**Description**
Initial Attempts (IA)	92–94	Deux coups de marteau initiaux commandés avec des déclencheurs d'arrêt de 4 et 5 heures, respectivement, ou une profondeur de 0,7 m signalée par TLM. TLM ne signale aucune extraction de ST ; STATIL signale des changements d'inclinaison significatifs, certains mouvements SS observés via des empreintes de pas
Diagnostics & Lift (D&L)	97–211	Collecte d'informations par le biais de campagnes d'imagerie à différents moments de la journée et de positions IDC, imagerie de la « fenêtre » SS et deux courts martelages diagnostiques. Le SS est ressaisi et soulevé de la taupe en trois étapes.
	118-158	Martelage de diagnostique (197-198 coups) sur 12 min
Pit Characterization (PC)	220–234	Imagerie de la taupe, de la fosse et de l'environnement
Regolith Interaction 1 (RI-1)	237–257	Des poussées à la pelle plate et des tests de hachage tentent d'effondrer la fosse
Pinning 1 (P1)	291–318	La taupe est épinglée horizontalement et verticalement - une pénétration réussie de ~ 5 cm prouve qu'il n'y a pas de pierre obstruant
Reversal 1 (REV1)	322–325	La reconfiguration du bras pour protéger le ST supprime le contact direct avec la taupe, ce qui entraîne une résistance insuffisante au rebond, un événement d'inversion de la taupe extrait ~ 18 cm
Pinning 2 (P2)	329–380	La taupe est épinglée horizontalement et verticalement. Une pénétration réussie et rapide permet de récupérer de l'événement d'inversion à peu près à la même profondeur qu'à la fin de l'épinglage 1
Reversal 2 (REV2)	400–407	La taupe est épinglée avec une précharge verticale uniquement - un autre événement d'inversion se produit, extrayant ~ 5 cm de la taupe
Regolith Interaction 2 (RI-2)	414–420	Un test de raclage du régolithe est effectué et des déblais sont exécutés dans le but d'affaler davantage le régolithe dans la fosse
Back Cap Push – Horizontal Scoop (BCP-H)	427–577	La taupe est poussée progressivement par la pelle sur son capuchon arrière, offrant une résistance directe au rebond et permettant à la taupe de descendre de ~ 7 cm jusqu'à ce que le capuchon arrière affleure la surface
Regolith Interaction 3 (RI-3)	598	Le régolithe est gratté dans la fosse, obscurcissant la majeure partie de la taupe
Back Cap Push – Inclined Scoop (BCP-I)	604–645	La taupe est poussée progressivement à l'aide d'une pelle inclinée, ce qui permet au capuchon arrière de descendre jusqu'à ~ 2 cm sous la surface
Regolith Interaction 4 (RI-4)	659–700	Plus de régolithe est gratté dans la fosse ; Chaque raclure est suivie d'une action de bourrage à la pelle plate
Final Free Mole Test (FFMT)	754	La pelle est positionnée comme pour le Back Cap Push pour éviter l'inversion de la taupe. 500 coups sont commandés, mais aucun mouvement vers l'avant n'est observé.

The InSight HP3 Penetrator (Mole) on Mars: Soil Properties Derived from the Penetration Attempts and Related Activities, 9 December 2022

La Saga Énergie sur Mars

Sol	MMR Date	Whr/sol	Tau
1	November 27, 2018	>3000	-
103	March 12, 2019	~2800	~1
225-232	July 23, 2019	~1950	~0.7
301-308	October 09, 2019	~1900	~0.6
376-402	January 13, 2020	~2100	~0.6
478-484	April 07, 2020	~2100	~0.7
519-525	May 19, 2020	<1975	~0.7
539-545	June 08, 2020	<1750	<1.0
560-566	June 30, 2020	~1300	~1.3
573-579	July 13, 2020	~1225	~1.3
580-586	July 20, 2020	~1200	~1.2
587-593	July 27, 2020	~1185	~1.2
594-600	August 4, 2020	~1175	~1.1
601-606	August 10, 2020	~1120	<1.1
607-613	August 17, 2020	~1100	~1.1
614-620	August 24, 2020	~1060	~1.0
621-627	August 31, 2020	~1100	~1.0
628-634	September 8, 2020	~1085	<1.0
635-640	September 14, 2020	~1070	~0.9
641-647	September 21, 2020	~1075	~0.9
648-654	September 28, 2020	~1070	<0.9
655-661	October 5, 2020	~1100	<0.9
662-668	October 13, 2020	~1080	~0.8

Recent (estimated) values:

Sol	Date	~Whr/Sol	~Tau
1346	September 10, 2022	420	0.8
1341	September 5, 2022	410	0.8
1333	August 27, 2022	400	0.88
1327	August 21, 2022	400	0.88
1321	August 14, 2022	400	0.83
1314	August 8, 2022	400	0.90
1306	July 31, 2022	400	0.91
1300	July 24, 2022	408	0.94
1292	July 16, 2022	385-400	0.99
1285	July 09, 2022	399	1.02
1278	July 02, 2022	400	1.02
1265	June 19, 2022	410	1.12

Selected Historic values:

Sol	Date	~Whr/Sol	~Tau
1190	April 2, 2022	680	0.81
1069	November 29, 2021	750	0.488
900	June 07, 2021	700	0.62
714	November 29, 2020	880	1.23
544	June 08, 2020	<1750	<1.0
401	January 13, 2020	2100	0.6
308	October 09, 2019	1900	0.61
232	July 23, 2019	1950	0.7
102	March 12, 2019	2800	1
0	November 27, 2018	>3000	-

INSTRUMENT	FONCTION	PUISSANCE (Watts)
MastCam-Z	Caméra scientifique	17
MEDA	Station météo	17
MOXIE	Production d'oxygène	300
PIXL	Spectromètre à rayon X	25
RIFMAX	Radar	10
SHERLOCK	Spectromètre et caméra	32
SuperCam	Spectromètre et caméra	18

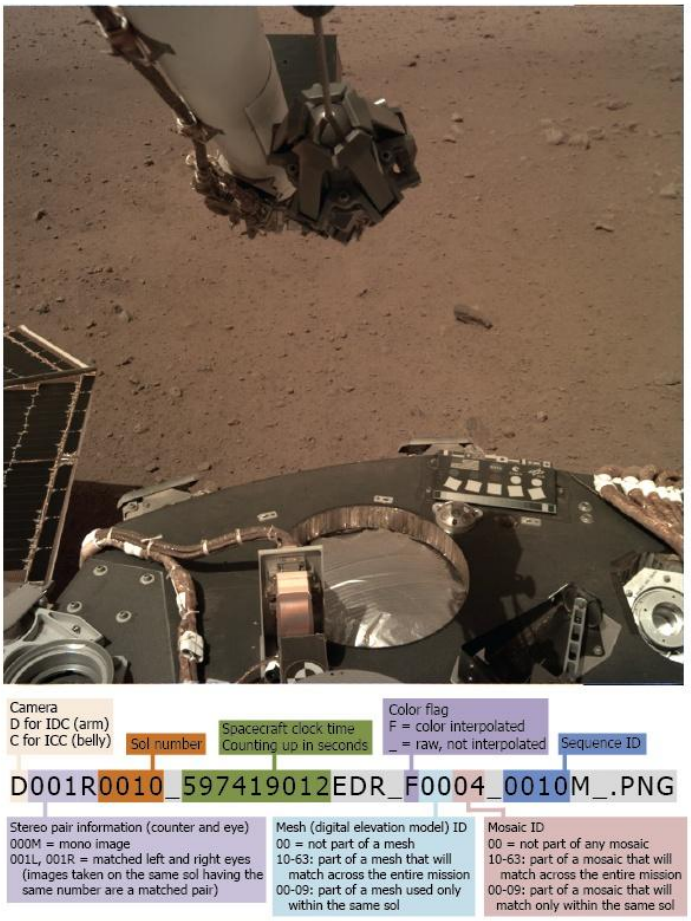
Résumé des mesures de conductivité thermique par l'instrument HP^3 dans la configuration de mesure finale après le Sol 754

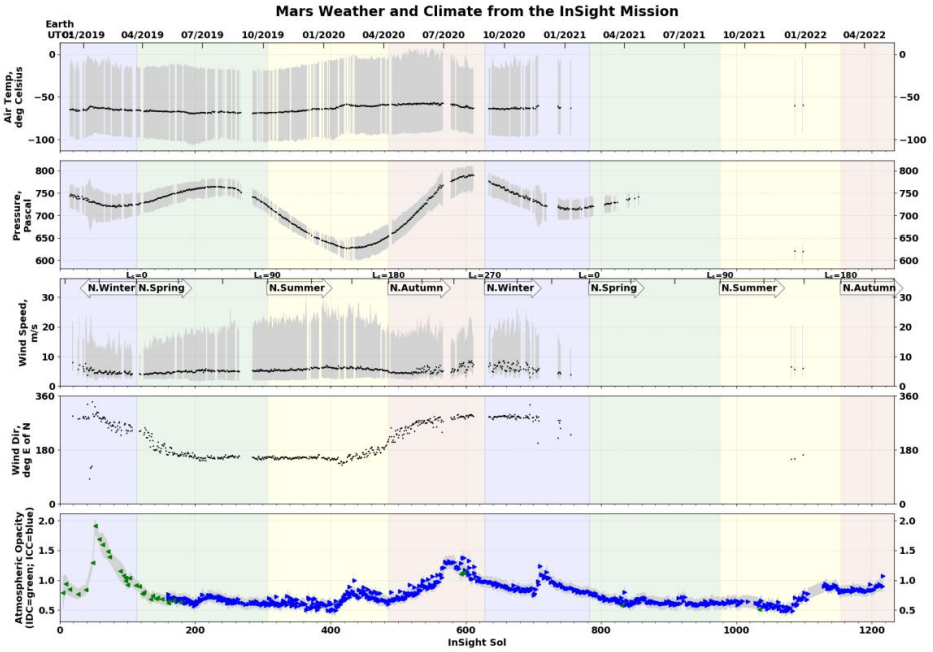
Sol	L s [°]	T 0 [K]	P avr [mbar]		P min [mbar]		Pmaxi [mbar]	ρ [kg m −3]	k [W m −1 K −1]
798	8.0	222.02	7h30	7.07	7.52	1 211	0,0388 ± 0,0009		
827	22,0	220.26	7.44	7h20	7.65	1 211	0,0392 ± 0,0006		
874	44.2	217,75	7.61	7.39	7h75	1 211	0,0395 ± 0,0006		
1070	135.3	218.61	6.39	6.21	6.53	1 211	0,0367 ± 0,0009		
1160	184,0	225.37	6h60	6h35	6,89	1 211	0,0371 ± 0,0007		
1204	210,0	226,83	7h20	6,96	7h40	1 211	0,0389 ± 0,0007		
798	8.0	222.02	7h30	7.07	7.52	1 007	0,0383 ± 0,0007		
827	22,0	220.26	7.44	7h20	7.65	1 007	0,0395 ± 0,0007		
874	44.2	217,75	7.61	7.39	7h75	1 007	0,0397 ± 0,0007		
1070	135.3	218.61	6.39	6.21	6.53	1 007	0,0366 ± 0,0007		
1160	184,0	225.37	6h60	6h35	6,89	1 007	0,0371 ± 0,0006		
1204	210,0	226,83	7h20	6,96	7h40	1 007	0,0390 ± 0,0008		

Remarque : Le numéro Sol de la mission, la longitude solaire martienne correspondante (L s), la température du sol au début de l'expérience T 0 , la pression atmosphérique moyenne (P avr), minimale (P min) et maximale (P max) pendant la mesure. , ainsi que la densité supposée du sol ρ sont indiqués avec la conductivité thermique k déterminée. Les densités choisies de 1 211 et 1 007 kg m^{-3} correspondent à des estimations qui incluent et n'incluent pas une contrainte supplémentaire posée par l'inertie thermique de surface (Grott et al., 2021), respectivement. Les barres d'erreur indiquées représentent des intervalles de confiance de 1 à σ.

https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2023GL102975

Code pour les fichiers images :



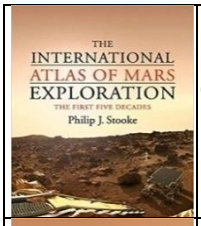
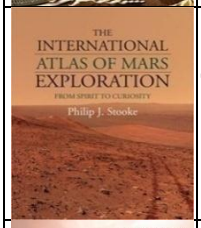
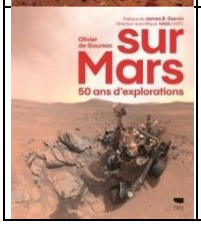


RÉFÉRENCES WEB

GÉNÉRALE

- Site de la Nasa
    - Mars Exploration : Sélection par mission
    https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions
    - Analyst's Notebook
    https://an.rsl.wustl.edu/
- Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology
    - Le site du Photojournal :
    http://photojournal.jpl.nasa.gov/
    - Sélection par Planète :
    http://mars.jpl.nasa.gov/missions/
    - Sélection par les Missions :
    http://photojournal.jpl.nasa.gov/Help/PIADetQuery.html
    - Liste des images Raws
    http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/all/spirit.html
- ESA : Agence Spatiele Européenne
    http://www.esa.int/esaCP/France.html
- Malin Space Science Systems : Mars Globale Surveyore
    http://www.msss.com/mars_images/moc/themes/LANDINGS.html
- The Planetary Society :
    http://www.planetary.org/blogs/
- Midnight Planets.com :
    http://www.midnightplanets.com/web/MERB/sites.html
- Flashespace en direct du ciel et de l'espace
    http://www.flashespace.com/archives.htm
- Planète Terre (Ens de Lyon)
    http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/actualite_des_labos/dossiers/nouvelles-mars
- Nirgal : De la Planète Rouge à l'origine de la Vie, de Philippe Labrot
    http://www.nirgal.net/main.html
- PlaneteAstronomie.com
    http://www.planetastronomy.com/dossiers-astro/mars-dossier.htm
- Planète Mars
    http://solarnews.over-blog.com/ext/http://www.planete-mars.com/
- Orbite Mars
    http://orbitmars.futura-sciences.com/
- Astrocosmos.net
    http://www.astrocosmos.net/canvas.php?page=archive.php
- Le site Astronomie-Astronautique de JcBoulay
    http://jcboulay.free.fr/index.htm
- Archive du Forum UMSF (Unmanned Space Flight, fermé depuis janvier 2025)
    https://umsfarchive.com/index.php/index.php

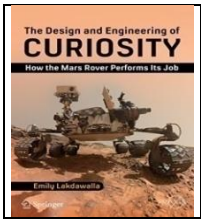
- Application MarsLife pour voir les panoramas en virtuelle 3D (Perseverance, Curiosity, Spirit et Opportunity)
https://marslife.org/
- Wikipedia : Mars (Planète)
http://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_(plan%C3%A8te)

	The International Atlas of Mars Exploration: Volume 1, Philip J. Stooke, Cambridge University Press 2012
	The International Atlas of Mars Exploration: Volume 2, Philip J. Stooke, Cambridge University Press 2014
	Sur Mars : 50 ans d'explorations martiennes, Olivier de Goursac, Delachaux et Niestlé 2026

CURIOSITY

- Nasa MSL Mission
https://science.nasa.gov/mission/msl-curiosity/
Updates
https://mars.nasa.gov/msl/mission-updates/
Raw Images
https://mars.nasa.gov/msl/multimedia/raw-images/?order=sol+desc%2Cinstrument_sort+asc%2Csample_type_sort+asc%2C+date_taken+desc&per_page=50&page=0&mission=msl
http://lcdm.ca/msl/3718/
Les mosaïques :
https://science.nasa.gov/mars/resources/?types=mosaics
What are Science Instruments?
https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/instruments/summary/
Curiosity Rover's Location
https://science.nasa.gov/mission/msl-curiosity/location-map/
PDS Geosciences Node : Mars Science Laboratory
https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/msl/index.htm
The Latest from Mars
https://mars.nasa.gov/msl/news/?page=0&per_page=40&order=publish_date+desc%2Ccreated_at+desc&search=&category=176%3A19%2C165%2C184%2C204&blank_scope=Latest&url_suffix=%3Fsite%3Dmsl

- JPL Nasa
http://mars.jpl.nasa.gov/msl/
- Spaceflight 101
http://www.spaceflight101.com/msl-mission-updates-4.html
- The Gale Gazette
http://galegazette.wordpress.com/2012/08/
- The Planetary Society : Mars Curiosity (Emily Lakdawalla)
https://www.planetary.org/space-missions/curiosity
Cartes de la trajectoire de Curiosity par Phil Stooke (mises à jour au sol 2305)
https://www.planetary.org/space-images/phil-stookes-curiosity-route-maps
- Astrobiologie Science Center
http://astrogeology.usgs.gov/news
- Midnight Planets, Banque d'images par sol
http://www.midnightplanets.com/contents.html
- The Mars Ogler
http://mars-ogler.com/
- Blog Marsrovers Images (Damia Bouic)
http://www.db-prods.net/
- Archive du Forum UMSF (Unmanned Space Flight, fermé depuis janvier 2025)
https://umsfarchive.com/index.php/viewforum.php?f=59
- Forum Astrosurf (Actualités de Curiosity - 2013)
Un merci très spécial aux interventions de Daniel alias vaufrègesI3
http://www.astrosurf.com/topic/113977-actualit%C3%A9s-de-curiosity-2013/
- Nirgal : Mars Science Laboratory, de Philippe Labrot
https://www.nirgal.net/msl.html
- Mars Science Laboratory Science Team Papers (Last updated: 25 February 2026)
https://science.nasa.gov/mission/msl-curiosity/science-highlights/#Research-Papers
- A Look Back: The Drilling Campaign of the Curiosity Rover during the Mars Science Laboratory's Prime Mission, Icarus Volume 350, 1 November 2020
https://www-robotics.jpl.nasa.gov/media/documents/1-s2.0-S0019103520302657-main_look_back_drilling_on_curiosity_part_ii.pdf
- Space Science Reviews, The Sample Analysis at Mars Investigation and Instrument Suite, 27 April 2012
https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-012-9879-z#Fig2
- AGU: Results From Curiosity Gale Crater
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/action/doSearch?AllField=Curiosity+Rover&SeriesKey=21699100&startPage=0&sortBy=Earliest



The Design and Engineering of Curiosity, Emily Lakdawalla, Springer 2018

InSight

- Site de la Nasa
https://mars.nasa.gov/insight/timeline/overview/
- Mission Updates
https://mars.nasa.gov/insight/news-and-events/news
- Raw Images
https://mars.nasa.gov/insight/multimedia/raw-images/?order=sol+desc%2Cdate_taken+desc&per_page=50&page=0&mission=insight
- InSight Research Papers
https://mars.nasa.gov/insight/mission/science/research-papers/
- Deutsches Zentrum fur Luft-und Raumfahrt, German Aerospace Center (DLR)
- The InSight mission logbook (Tilman Spohn)
https://www.dlr.de/blogs/en/authors/Tilman-Spohn.aspx
- Le site du constructeur du sismoraphes SEIS de la sonde InSight
https://www.seis-insight.eu/fr/
Liste des Séisme sur un globe martien virtuel : https://namazu.unice.fr/marsview/
- SEIS: Insight's Seismic Experiment for Internal Structure of Mars
https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-018-0574-6
- InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) 22 janvier 2023
https://www.eoportal.org/satellite-missions/insight#moles-on-earth-as-guinea-pigs
- The InSight HP3 Penetrator (Mole) on Mars: Soil Properties Derived from the Penetration Attempts and Related Activities, 09 décembre 2022
https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-022-00941-z
- Spaceflight101.com, InSight Instrument Overview
https://spaceflight101.com/insight/insight-instruments/
- Archive du Forum UMSF (Unmanned Space Flight, fermé depuis janvier 2025)
https://umsfarchive.com/index.php/viewforum.php?f=83
- Forum AstruSurf
http://www.astrosurf.com/topic/118574-insight-sonder-lint%C3%A9rieur-de-mars/
- Nirgal : Programme InSight, de Philippe Labrot
https://www.nirgal.net/insight.html
- CNES
https://insight.cnes.fr/fr/news/espace-pro-ou-site-autonome/7889
- Wikipedia : Programme InSight
https://fr.wikipedia.org/wiki/InSight
- AGU: Journal of Geophysical Research: Planets
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/action/doSearch?Ppub=&field1=AllField&publication%5B%5D=21699100&text1=InSight&startPage=0&sortBy=Earliest

Le Tome 2 poursuit l'épopée des missions d'exploration spatiales de la surface martienne qui ont réussi à se poser avec succès à la surface de la planète Mars, avec les missions d'exploration InSight et MSL-Curiosity. Le déroulement de chaque mission ainsi que les différentes découvertes scientifiques sont décrites de manière chronologique, et illustrée à l'aide des différents clichés panoramiques prises à la surface de la planète rouge entre les années 2012 et suivante. Participer vous aussi à cette extraordinaire aventure humaine axée sur la découverte de la surface d'un nouveau Monde.

MSL-Curiosity, Insight